

1994

Les vibrations engendrées par les marteaux-riveteurs dans l'assemblage aérospatial

Paul-Émile Boileau
IRSST

Jérôme Boutin
IRSST

Pierre Drouin
IRSST

Henri Scory
IRSST

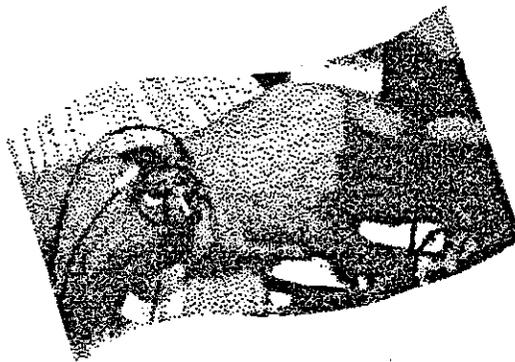
Suivez ce contenu et d'autres travaux à l'adresse suivante: <https://pharesst.irsst.qc.ca/rapports-scientifique>

Citation recommandée

Boileau, P. E., Boutin, J., Drouin, P. et Scory, H. (1994). *Les vibrations engendrées par les marteaux-riveteurs dans l'assemblage aérospatial* (Rapport n° R-081). IRSST.

Ce document vous est proposé en libre accès et gratuitement par PhareSST. Il a été accepté pour inclusion dans Rapports de recherche scientifique par un administrateur autorisé de PhareSST. Pour plus d'informations, veuillez contacter pharesst@irsst.qc.ca.

**Les vibrations engendrées
par les marteaux-riveteurs
dans l'assemblage aérospatial**



**ÉTUDES ET
RECHERCHES**

**Paul-Émile Boileau
Jérôme Boulin
Pierre Drouin
Henri Scory**

Janvier 1994

R-081

RAPPORT



IRSST
Institut de recherche
en santé et en sécurité
du travail du Québec

La recherche, pour mieux comprendre

L'Institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec (IRSST) est un organisme de recherche scientifique voué à l'identification et à l'élimination à la source des dangers professionnels, et à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes. Financé par la CSST, l'Institut réalise et finance, par subvention ou contrats, des recherches qui visent à réduire les coûts humains et financiers occasionnés par les accidents de travail et les maladies professionnelles.

Pour tout connaître de l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par la CSST et l'Institut.

Les résultats des travaux de l'Institut sont présentés dans une série de publications, disponibles sur demande à la Direction des communications.

Il est possible de se procurer le catalogue des publications de l'Institut et de s'abonner à *Prévention au travail* en écrivant à l'adresse au bas de cette page.

ATTENTION

Cette version numérique vous est offerte à titre d'information seulement. Bien que tout ait été mis en œuvre pour préserver la qualité des documents lors du transfert numérique, il se peut que certains caractères aient été omis, altérés ou effacés. Les données contenues dans les tableaux et graphiques doivent être vérifiées à l'aide de la version papier avant utilisation.

Dépôt légal
Bibliothèque nationale du Québec

IRSST - Direction des communications
505, boul. de Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : (514) 288-1 551
Télécopieur: (514) 288-7636
Site internet : www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche en santé
et en sécurité du travail du Québec,

Les vibrations engendrées par les marteaux-riveteurs dans l'assemblage aérospatial

**Paul-Émile Boileau, Jérôme Boutin,
Pierre Brouin et Henri Scory
Programme sécurité-ingénierie, IRSST**

**ÉTUDES ET
RECHERCHES**

RAPPORT

Cette étude a été financée par l'IRSST. Les conclusions et recommandations sont celles des auteurs.

© Institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec, janvier 1994.

1^{er} trimestre 1994.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
1.0 INTRODUCTION	1
2.0 BUT DE L'ÉTUDE	2
3.0 MÉTHODOLOGIE	3
3.1 Description du montage expérimental et des outils	3
3.2 Mesures de vibrations mains-bras	4
3.3 Traitement des données	5
4.0 RÉSULTATS ET DISCUSSION	6
4.1 Mesures de vibrations selon l'axe de percussion z_h	6
4.1.1 Mesures de vibrations sur la poignée des outils (axe de percussion)	7
4.1.2 Mesures de vibrations sur le poignet des opérateurs (axe z)	8
4.2 Mesures de vibrations en directions transversales	10
4.3 Évaluation du degré impulsif des vibrations	10
4.4 Estimation de la période de latence pour le phénomène de Raynaud	11
5.0 CONCLUSIONS	12
BIBLIOGRAPHIE	14
FIGURES 1 À 9	15-23
TABLEAUX 1 À 15	24-38
ANNEXE - Représentation des résultats sous forme d'histogrammes	39

1.0 INTRODUCTION

Le rivetage constitue une technique d'assemblage de tôles par rivets qui est largement utilisée dans l'industrie aérospatiale. Cette technique est de loin la préférée à cause de sa grande fiabilité, de la grande productivité qu'elle procure et de son faible coût. L'opération de rivetage dans la construction aérospatiale nécessite deux opérateurs : un manipulant le marteau-riveteur, l'autre maniant un bélier («bucking bar»), qu'il appuie contre la tôle et éventuellement contre le rivet afin de permettre l'écrasement des rivets. Le marteau-riveteur étant un outil percutant pneumatique, des vibrations et des chocs, pouvant atteindre de grandes intensités sont transmis aux mains du riveur ainsi que du manipulateur du bélier.

En Suède, il a été démontré [1] que 50 % d'une population de travailleurs assignés au rivetage dans un chantier aéronautique développent des symptômes associés au phénomène de Raynaud après en moyenne six années de travail. Ces données sont d'autant plus impressionnantes si l'on considère que la durée effective réelle pendant laquelle les mains sont exposées à des vibrations est estimée à 15 minutes par jour (temps réel pendant lequel le marteau percute les rivets).

Le lien de causalité entre l'exposition aux vibrations des mains et l'affection vasculaire, tel le phénomène de Raynaud, est maintenant bien établi [2, 3, 4]. D'ailleurs, la norme ISO 5349 [5] qui représente le guide le plus largement reconnu pour mesurer et analyser les vibrations agissant sur le système mains-bras, fait référence à une relation dose-effet permettant d'estimer la prévalence, soit le percentile de population exposée, susceptible de démontrer des symptômes associés au phénomène de Raynaud (e.g. blanchissement des doigts) ainsi que la période de latence, mesurée en années d'exposition avant l'apparition des premiers symptômes, lorsque l'on connaît le niveau de vibrations équivalant à quatre heures d'utilisation d'outils vibrants par jour (niveau mesuré à l'interface entre la main et la surface vibrante).

Starck et Pyykko [6] suggèrent que le degré impulsif des vibrations pourrait avoir une influence importante sur l'apparition du syndrome vasculaire puisque les chocs ou impacts de grande intensité pourraient mener à une dégradation des tissus, augmentant ainsi les risques d'atteinte. Ce facteur n'est pas pris en considération dans la relation proposée, tout comme ne le sont pas non plus les composantes vibratoires de hautes fréquences dont les niveaux pourraient ne pas être à négliger dans le cas des riveteuses. Ainsi, la norme ISO 5349 se limite à considérer les composantes vibratoires inférieures à 1250 Hz, ce qui pourrait expliquer la sous-estimation du risque noté par Dandanell [7] dans son étude sur les marteaux-riveteurs. Reste à savoir jusqu'à quel point ces composantes de hautes fréquences (i.e. supérieures à 1250 Hz) sont transmises à la main des travailleurs dans le cas des marteaux-riveteurs.

Une méthode de mesure de vibration développée en Finlande fait usage d'un bracelet spécial pour évaluer les vibrations au niveau du poignet [8]. Bien que cette méthode ne soit pas celle préconisée dans la norme ISO 5349, son application par Pekkarinen et collègues [9] sur des tronçonneuses et des meuleuses a démontré que le niveau efficace non pondéré des vibrations mesurées au poignet était à toutes fins pratiques identique au niveau efficace pondéré des vibrations mesurées sur la poignée de l'outil, près de la main. La pondération définie dans la norme ISO 5349, exprime la différence de sensibilité relative de la main à différentes fréquences et de ce fait, ne peut être appliquée qu'aux mesures entre la main et la source de vibration. Cependant, il est permis de douter que les résultats obtenus par Pekkarinen auraient été les mêmes avec un outil percutant comme le marteau-riveteur, pour lequel des composantes vibratoires de très grandes amplitudes sont causées par les chocs à hautes fréquences.

Il existe différents types de marteaux-riveteurs possédant des dimensions et caractéristiques différentes pour que la puissance soit suffisante pour des rivets de différents matériaux et diamètres. De même, différents types de béliers sont disponibles dont le poids, les dimensions et la géométrie varient selon le type de travail.

La technologie de conception de cet outil avait relativement peu évolué jusqu'à tout récemment avec l'arrivée sur le marché d'un marteau-riveteur et d'un bélier dit «antivibratiles». Cette nouvelle génération introduit par Atlas-Copco, fait appel à un coussin pneumatique entre la tête du piston frappeur et l'armature de l'outil. Ce coussin agit comme un ressort, amortissant les vibrations transmises aux mains de l'opérateur. Parallèlement, un ressort incorporé dans la tête du bélier atténue les vibrations transmises aux mains du manipulateur. Cependant, peu de données sont disponibles sur les niveaux de vibrations et les fréquences générées par cet outil en comparaison avec un marteau-riveteur conventionnel de même puissance, lorsque utilisé en situations normales de travail.

2.0 BUT DE L'ÉTUDE

L'étude vise principalement à évaluer les niveaux d'exposition aux vibrations mains-bras auxquels sont assujettis les opérateurs de marteaux-riveteurs et de béliers lors d'opérations typiquement rencontrées dans l'assemblage aérospatial. Deux types de marteaux conventionnels sont comparés à des équivalents ayant reçu un traitement antivibratile; le premier étant commercialement connu sous le nom «antivibration», l'autre ayant été recouvert de matériau viscoélastique et comportant un silencieux pour réduire le bruit. Parallèlement, un bélier métallique est comparé à un bélier commercialement connu sous le nom «antivibration». De plus, l'efficacité d'absorption des vibrations par des tampons amortisseurs conçus pour réduire le bruit est évaluée, ces derniers consistant en deux plaques que l'on applique sur la structure

en introduisant un vide entre les plaques et la structure. Enfin, l'étude vise à faire l'application d'une méthode de mesure des vibrations au niveau du poignet, afin d'identifier dans quelle mesure l'efficacité d'atténuation des vibrations par des moyens «antivibrations» telle que mesurée sur la poignée des outils concorde avec l'efficacité telle que mesurée en utilisant les vibrations transmises au poignet des opérateurs.

3.0 MÉTHODOLOGIE

3.1 Description du montage expérimental et des outils

Au départ, les essais devaient être réalisés dans une usine aérospatiale durant l'assemblage réel d'avions. Devant les difficultés que ceci aurait engendré au niveau de la productivité, il a été décidé de faire l'acquisition d'un panneau de carlingue de Boeing afin de simuler les opérations de rivetage en laboratoire. Les services d'un expert dans l'assemblage d'avions ont été retenus pour effectuer le montage expérimental devant représenter le plus près possible un montage typique dans une usine. Ce même expert, lui-même étant responsable de la formation des riveurs dans une usine aérospatiale, a procédé à toutes les opérations de rivetage faisant partie de cette étude. Il était donc habilité à connaître les techniques les plus recommandées ainsi que les postures impliquées dans des situations réelles d'assemblage. De plus, un opérateur de bélier a pu être formé de la même façon que d'autres employés d'une usine aérospatiale.

Le montage expérimental consiste en un panneau de carlingue d'avion d'environ 3 m par 1.5 m monté sur un échafaudage caractéristique de ce qui peut être rencontré lors de l'assemblage d'un Boeing (figure 1). Ce montage est installé dans une chambre anéchoïque pour permettre la mesure du bruit engendré en plus des vibrations. Le panneau de carlingue contient plusieurs rangées de trous permettant l'insertion de rivets dont le diamètre est d'environ 4 mm. Pour chacun des essais, entre 15 et 20 rivets sont insérés successivement à une même hauteur. Un essai est caractérisé par le type de marteau-riveteur, le type de bélier, la hauteur d'application des rivets (indirectement reliée à la posture adoptée), l'utilisation ou non d'un tampon amortisseur et par le côté pour lequel les données sont enregistrées (i.e. côté riveur ou côté bélier).

Quatre types de marteaux-riveteurs sont soumis aux essais : marteau A étant un Chicago Pneumatic de type 4X, marteau B étant l'équivalent de A mais étant commercialement connu sous le qualificatif «antivibration» (Atlas Copco RRH 06), marteau C étant un Chicago Pneumatic de type 2X et marteau D étant un Chicago Pneumatic de type 2X mais étant recouvert de matériau viscoélastique et comportant un silencieux (modifications ayant été apportées par les

utilisateurs). Ces deux derniers marteaux sont réellement les mêmes, bien qu'à la limite on pourrait qualifier le marteau D d'antivibration puisqu'il a été recouvert d'un matériau visant à réduire le bruit et les vibrations. Ces marteaux sont des modèles typiquement utilisés dans une usine d'assemblage de Boeing.

Deux types de bélier sont utilisés : le premier étant un bélier métallique conventionnel de forme rectangulaire dont la masse est d'environ 1 kg, le deuxième étant un bélier amortissant de type Atlas Copco CL-4004. Ce dernier comporte un ressort entre la poignée et la pièce d'appui sur la tôle. Ces deux types de bélier sont couramment utilisés dans les usines d'assemblage. Les marteaux-riveteurs et les béliers sont représentés dans la figure 2.

Certains essais sont effectués en utilisant des tampons amortisseurs visant principalement à réduire le bruit radié par les vibrations de la tôle. On rapporte [10] que l'utilisation de ces tampons pourrait réduire le bruit radié de 4 à 6 dBA. Ces tampons sont appliqués sur la tôle de chaque côté du trou où un rivet doit être posé. On ajoute ainsi de l'inertie à la structure du panneau, ce qui pourrait subséquentement engendrer également une réduction des vibrations transmises aux mains des travailleurs. Les tampons consistent en deux plaques d'aluminium dont le contour comprend une lisière de caoutchouc polysulfide. Ces plaques (figure 3) sont fixées sur la tôle en introduisant un vide entre celle-ci et les tampons à l'aide d'une pompe à vide.

Tous les essais sont effectués avec le même opérateur de marteau-riveteur et le même opérateur de bélier. Les mesures de vibration sont réalisées en fixant des accéléromètres au poignet ainsi que sur la poignée des outils dans trois directions perpendiculaires. Les essais sont donc répartis, d'une part du côté du marteau-riveteur (6 canaux de mesure), d'autre part du côté du bélier (6 canaux également).

3.2 Mesures de vibrations mains-bras

Les mesures étant effectuées au niveau de la poignée se conforment à la norme ISO 5349. Trois accéléromètres piézoélectriques miniatures installés à angle droit sur un adaptateur spécialement conçu sont fixés sur la poignée des outils, tantôt pour le marteau-riveteur (figure 4), tantôt pour le bélier (figure 5). Des filtres mécaniques sont incorporés entre les accéléromètres et l'adaptateur afin de protéger ces derniers contre des niveaux élevés de vibrations hautes fréquences susceptibles d'être engendrées. L'axe z_h correspond à l'axe de l'avant-bras ou l'axe de percussion de l'outil, l'axe x_h est perpendiculaire à la paume de la main tandis que l'axe y_h est orienté en direction parallèle à la surface de fixation des rivets.

Pour les vibrations transmises au poignet des opérateurs, un bracelet spécial incorporant trois accéléromètres miniatures est utilisé tel que représenté dans les figures 4 et 5. Ici, le système de coordonnées biodynamique est utilisé. D'après les figures 4 et 5, on constate que les axes au poignet ne correspondent pas exactement aux axes définis au niveau de la poignée. Ceci dépend de l'orientation de l'avant-bras qui, dépendant de la hauteur d'application des rivets, ne pourra pas nécessairement être aligné avec l'axe de percussion de l'outil. Lorsque le rivetage est effectué à la hauteur représentée dans les figures 4 et 5, on constate que l'axe z au poignet fait un angle de 30 à 35 degrés avec l'axe z_h sur la poignée du côté du marteau-riveteur et de 18 à 20 degrés du côté du bélier. Un facteur multiplicateur de correction correspondant à l'inverse du cosinus de cet angle aurait donc à être appliqué à l'amplitude des vibrations mesurées au poignet afin de les mettre en relation avec les amplitudes mesurées sur l'outil dans une direction donnée. Des modifications à l'angle que fait l'axe de mesure sur l'outil avec l'axe de mesure au poignet doivent cependant être apportées lorsque l'orientation de l'avant-bras est modifiée.

Les signaux vibratoires provenant des accéléromètres sont conditionnés dans des amplificateurs de charge dont la bande passante se situe entre 2 Hz et 10 kHz. Les signaux d'accélération sont par la suite transmis à un enregistreur numérique comportant 8 canaux, permettant l'enregistrement jusqu'à une fréquence maximale de 5 kHz. Un essai correspond à l'insertion de 15 à 20 rivets pour chaque combinaison de marteau/bélier à une hauteur donnée. Chaque essai est répété; dans un cas les mesures sont effectuées du côté du marteau-riveteur, dans l'autre, du côté du bélier.

3.3 Traitement des données

Pour chacune des combinaisons marteau-riveteur/bélier, le spectre en fréquences en bandes de tiers d'octave est obtenu entre 6.3 et 5000 Hz. Ce spectre est obtenu pour chacun des rivets posés en éliminant les périodes d'arrêt entre chaque rivet, ces périodes étant susceptibles de modifier les intensités pendant le processus d'intégration. Pour ce faire, les salves de signaux (voir exemple figure 6) sont observées dans le domaine temporel pour chacun des rivets afin de délimiter le signal devant servir à l'établissement du spectre. Le spectre est obtenu pour chacun des rivets composant un essai, et la moyenne du spectre pour l'ensemble des rivets est obtenue. Ceci est répété pour chacun des axes de mesure sur la poignée de l'outil et sur le poignet de l'opérateur, autant du côté du marteau-riveteur que du bélier, à chacune des hauteurs identifiées sur le montage expérimental.

Pour les vibrations enregistrées sur la poignée des outils, le niveau d'accélération globale pondérée pour l'ensemble des rivets est obtenu entre 6.3 et 1250 Hz. Pour les vibrations enregistrées au poignet, le niveau d'accélération globale non pondérée est évalué entre 6.3 et 1250 Hz. Dans les deux cas, on note également le niveau d'accélération globale non pondérée entre 6.3 et 5000 Hz. La fréquence centrale de la bande de fréquence pour laquelle l'exposition est maximale est également notée. Le facteur de crête f_c , indiquant le degré impulsif des vibrations, est évalué en utilisant les signaux vibratoires enregistrés sur la poignée des outils selon l'axe de percussion. Le facteur de crête est défini comme étant le rapport de l'accélération instantanée crête à l'accélération efficace globale déterminée dans la gamme de fréquences d'intérêt pour l'ensemble des rivets. Ces valeurs peuvent être pondérées ou non.

4.0 RÉSULTATS ET DISCUSSION

4.1 Mesures de vibrations selon l'axe de percussion z_h

La figure 7 présente les spectres en fréquence des vibrations (accélérations non pondérées) enregistrées sur la poignée des outils en direction de l'axe de percussion z_h lorsque le marteau A est utilisé. Des spectres similaires sont obtenus pour les autres marteaux. La figure 8 présente les spectres, cette fois, pour les vibrations enregistrées au poignet (accélérations non pondérées). Les niveaux de vibrations sont exprimés en dB avec une accélération de référence de $1 \mu\text{ms}^{-2}$. Dans le cas des marteaux A et B, deux pics apparaissent, l'un à 25, l'autre à 50 Hz. Pour les marteaux C et D, ces pics apparaissent dans les bandes de fréquence centrées à 40 et 80 Hz. Ces fréquences sont directement liées à la cadence de frappe du piston-frappeur et ressortent autant du côté de l'opérateur du marteau-riveteur que de celui du bélier.

De façon générale, les niveaux de vibrations sont passablement plus élevés du côté du bélier que du côté du marteau-riveteur, particulièrement lorsque le bélier conventionnel est utilisé, et ce sur presque toute la gamme de fréquences d'intérêt. De plus, c'est généralement du côté du bélier conventionnel que les niveaux de vibrations sont les plus importants. Ces constatations s'avèrent vraies autant pour les vibrations mesurées sur la poignée des outils que sur le poignet des opérateurs pour les marteaux A et B. De façon évidente, on voit que les niveaux de vibrations mesurées au poignet sont d'une amplitude beaucoup plus faible à hautes fréquences que les niveaux mesurés sur la poignée, indiquant que la main provoque une atténuation notable des vibrations à hautes fréquences. L'énergie vibratoire transmise au poignet provient donc principalement des impacts provoqués par le piston-frappeur.

4.1.1 Mesures de vibrations sur la poignée des outils (axe de percussion)

Les tableaux 1 et 2 présentent les niveaux d'accélération globale pondérée (6.3-1250 Hz) mesurés selon l'axe de percussion sur la poignée des béliers et des marteaux-riveteurs respectivement avec et sans l'utilisation de tampons amortisseurs. Ces tableaux sont représentés sous forme d'histogrammes dans l'annexe. Ces mesures sont effectuées pour des hauteurs équivalentes afin d'éliminer l'influence que cette variable pourrait avoir sur les résultats. Les tableaux 3 et 4 (également présentés dans l'annexe) présentent quant à eux les niveaux d'accélération globale non pondérée dans la gamme 6.3 à 5000 Hz. Ces niveaux sont évidemment de beaucoup supérieurs aux niveaux pondérés entre 6.3 et 1250 Hz. Cette différence s'explique principalement par la pondération elle-même, et non pas parce que les composantes vibratoires excédant 1250 Hz ont un apport important sur le niveau global. En effet, le niveau global non pondéré 6.3 à 5000 Hz n'est que de 10 à 20% supérieur au niveau global non pondéré 6.3 à 1250 Hz. Dans les deux cas, la fréquence à laquelle le niveau est maximal est la même. Ces résultats suggèrent donc que les composantes vibratoires excédant 1250 Hz n'ont que peu d'influence sur le niveau global d'exposition.

De façon générale, les observations que l'on peut faire à partir des accélérations globales pondérées mesurées sur la poignée sont les mêmes que pour les accélérations globales non pondérées (6.3-5000 Hz), du moins en ce qui concerne les points suivants :

- l'utilisation d'un bélier amortissant muni d'un ressort pour amortir les vibrations représente une nette amélioration pour réduire le niveau d'accélération globale pondérée du côté du bélier comparativement à un bélier conventionnel. Les niveaux de vibrations peuvent être réduits par un facteur atteignant 10 dB lorsqu'un bélier antivibration est utilisé, ramenant ainsi les niveaux à un degré comparable à ceux enregistrés du côté du marteau-riveteur. L'effet du bélier n'apparaît pas de façon évidente du côté du marteau-riveteur sauf peut-être lorsque le marteau B est utilisé. Lorsque le bélier conventionnel est utilisé, on doit s'attendre à ce que l'opérateur de bélier soit exposé à des niveaux de vibrations de l'ordre de 3 à 5 fois les niveaux enregistrés pour l'opérateur de marteau-riveteur;
- une comparaison entre les marteaux-riveteurs A et B, B étant un marteau muni d'un dispositif antivibratile, démontre que ce dernier amène une légère diminution des niveaux de vibrations du côté de l'opérateur du marteau-riveteur, cette diminution étant la plus notable lorsqu'un bélier antivibration est également utilisé. Cependant, l'utilisation du marteau antivibration B mène à une augmentation importante des niveaux de vibration pour l'opérateur de bélier, suggérant ainsi que l'énergie de frappe est directement transmise au rivet et au bélier au lieu d'être dissipée.

Du côté du marteau-riveteur, l'utilisation d'un marteau-riveteur antivibration avec un bélier antivibration constitue la meilleure combinaison pour minimiser l'exposition de son opérateur. Du côté du bélier, la meilleure combinaison est l'utilisation d'un marteau conventionnel avec un bélier antivibration. Cette dernière combinaison représente un compromis qui permettrait à l'opérateur de marteau-riveteur et à celui de bélier d'être exposés à des niveaux similaires. Quant aux marteaux C et D, il n'apparaît pas de différences significatives tant du côté du marteau que du côté du bélier puisque en fait, ce sont les mêmes marteaux, le marteau D étant recouvert de matériau viscoélastique que l'on enlève pour effectuer les mesures sur la poignée; ceci pour éviter de former avec l'accéléromètre, un système masse-ressort dont les résultats seraient attribuables au système de mesure seulement.

- dépendant de la combinaison de marteau-riveteur et bélier, l'utilisation de tampons amortisseurs n'a qu'un effet négligeable pour diminuer l'exposition aux vibrations. L'effet le plus notable est obtenu lorsque les marteaux A et C sont utilisés en conjonction avec un bélier antivibration. Dans ces cas, une légère diminution de l'exposition est enregistrée tant du côté du marteau-riveteur que du bélier.

4.1.2 Mesures de vibrations sur le poignet des opérateurs (axe z)

Les tableaux 5 et 6 (également présentés sous forme d'histogrammes dans l'annexe) présentent les niveaux d'accélération globale non pondérée mesurés respectivement sur le poignet de l'opérateur de bélier et de l'opérateur de marteau-riveteur pour les vibrations transmises selon l'axe z. Ces niveaux ne sont pas pondérés puisque l'influence de la main sur la poignée est déjà prise en considération, le point de mesure étant le poignet. D'ailleurs, l'allure des spectres en fréquence le démontre bien, la main agissant comme un filtre, ne laissant passer que l'énergie vibratoire concentrée autour de la fréquence de frappe. Les vibrations de hautes fréquences se voient ainsi atténuées, suivant le principe impliqué par la pondération définie dans la norme ISO 5349. Ceci est représenté dans la figure 9 où les spectres pondéré et non pondéré des vibrations enregistrées sur la poignée du marteau A sont comparés au spectre non pondéré des vibrations sur le poignet de l'opérateur. D'ailleurs, le niveau d'accélération globale non pondérée entre 6.3 et 1250 Hz est à toutes fins pratiques identique au niveau d'accélération globale non pondérée entre 6.3 et 5000 Hz pour les vibrations enregistrées au poignet.

Du côté de l'opérateur de bélier, le niveau d'accélération globale non pondérée au poignet ressemble beaucoup, à quelques exceptions près, au niveau d'accélération globale pondérée mesuré sur la poignée du bélier. Ce n'est pas le cas du côté de l'opérateur de marteau-riveteur pour lequel le niveau non pondéré au poignet est constamment supérieur au niveau pondéré sur la poignée, pouvant être de 4 à 5 fois supérieur. Bien que difficilement explicable, il pourrait

s'agir d'un couplage plus direct de la main avec le marteau-riveteur, ce qui n'est pas le cas avec le bélier pour lequel le contact ne se fait réellement qu'avec la paume de la main. En effet, la position de la main, la force de préhension et la force de poussée ont une influence considérable dans la transmission des vibrations au système mains-bras.

Avec les données recueillies au poignet, les observations sont, à quelques exceptions près, similaires à celles provenant des mesures sur la poignée, c'est-à-dire :

- l'utilisation d'un bélier antivibration amène une diminution notable des vibrations pour l'opérateur de bélier, cette diminution pouvant atteindre 10 dB par rapport à l'utilisation d'un bélier conventionnel. Cependant, l'effet du bélier antivibration n'est pas apparent du côté de l'opérateur du marteau-riveteur;
- l'utilisation d'un marteau-riveteur antivibration de marque commerciale amène une légère diminution des vibrations pour l'opérateur de marteau-riveteur, tout en augmentant les vibrations pour l'opérateur de bélier, qu'il soit conventionnel ou non. Cette différence n'est pas observable de façon significative pour les marteaux C et D;
- du côté du bélier, la meilleure combinaison pour minimiser l'exposition aux vibrations semble être l'utilisation d'un marteau-riveteur conventionnel avec un bélier antivibration. Du côté du marteau-riveteur, l'utilisation d'un marteau antivibration avec bélier antivibration mène à une exposition plus faible. Ces résultats concordent avec ce qui est observé à partir des mesures effectuées sur la poignée. Puisque l'opérateur de bélier est généralement exposé à des niveaux plus élevés, particulièrement lorsqu'un bélier conventionnel est utilisé, le meilleur compromis pour les deux opérateurs semble être l'utilisation d'un marteau-riveteur conventionnel avec un bélier antivibration;
- l'effet des tampons amortisseurs n'apparaît pas comme étant évident. Les résultats suggèrent qu'il pourrait y avoir un effet bénéfique du côté de l'opérateur de marteau, particulièrement lorsque les marteaux C et D sont utilisés.

Les observations que l'on tire des mesures de vibrations effectuées au poignet, sont à bien des égards semblables à celles effectuées sur la poignée. Cependant, la valeur absolue des niveaux mesurés demeure quand même difficile à interpréter. D'abord, il n'y a aucune norme qui permet d'interpréter les résultats des mesures effectuées au poignet. En deuxième lieu, l'intensité des vibrations transmises au poignet étant fonction de la force de préhension et de l'orientation du poignet par rapport à l'outil, il est difficile de maintenir des conditions identiques pour l'ensemble des essais, rendant ainsi difficile l'estimation de l'effet que le marteau, le bélier

ou les tampons amortisseurs peuvent avoir sur l'énergie vibratoire qui distinguerait l'utilisation de chacun d'eux. À ce titre, l'énergie vibratoire sur la poignée représenterait peut-être plus précisément la différence entre les outils, bien que les niveaux enregistrés au poignet soient représentatifs de l'énergie réellement transmise à travers la main.

4.2 Mesures de vibrations en directions transversales

Les tableaux 7 et 8 présentent respectivement les niveaux de vibrations transversales (x_h et y_h) mesurés sur la poignée et au poignet des opérateurs lorsque les marteaux A et B sont utilisés conjointement avec les béliers conventionnel et antivibration. Côté marteau, les niveaux de vibrations transversales sont généralement de beaucoup inférieurs aux niveaux enregistrés selon l'axe dominant z_h et ce, particulièrement pour les vibrations sur la poignée. Les niveaux non pondérés au poignet en directions transversales peuvent être du même ordre de grandeur qu'en direction verticale, si bien qu'il peut être difficile d'identifier un axe dominant. Ceci est dû en grande partie à l'orientation du poignet qui peut changer pendant les essais. Or, le vecteur somme peut être obtenu tel que représenté dans le tableau 9. Côté bélier, les mêmes observations sont faites, sauf que les différences entre les niveaux de vibrations transversales et ceux de l'axe z_h sont peut-être moins grandes, particulièrement lorsque le bélier antivibration est utilisé.

En incluant l'effet des vibrations transversales, c'est-à-dire en considérant la somme vectorielle des vibrations, on arrive aux mêmes conclusions qu'avec les vibrations selon l'axe de percussion, notamment que le marteau B provoque moins de vibrations que le marteau A pour l'opérateur de marteau, mais par contre il en provoque plus pour l'opérateur de bélier. L'utilisation d'un bélier antivibration réduit l'exposition de l'opérateur de bélier considérablement, par contre cela n'a que peu d'effet pour l'opérateur de marteau.

4.3 Évaluation du degré impulsif des vibrations

Le facteur de crête, par définition, représente le rapport du niveau d'accélération crête au niveau d'accélération efficace et de ce fait, constitue une mesure du degré impulsif des vibrations. En effet, plus le facteur de crête est élevé, plus la valeur instantanée d'accélération à un instant donné est élevée comparativement à la moyenne des niveaux, donc indicateur de chocs caractérisés par des niveaux de vibrations très élevés causés par les impacts.

Les tableaux 10 et 11 (également présentés sous forme d'histogrammes dans l'annexe) présentent les facteurs de crête mesurés sur la poignée des béliers et des marteaux-riveteurs respectivement une fois que les signaux vibratoires ont été pondérés suivant les recommandations de la norme

ISO 5349. Ici, la valeur efficace d'accélération est obtenue pour l'ensemble des rivets constituant un essai mais la valeur crête est celle correspondant à la valeur instantanée d'accélération la plus élevée pour l'ensemble des rivets. On note que le facteur de crête est généralement plus élevé sur la poignée du bélier antivibration que sur celle du bélier conventionnel bien que le bélier antivibration apporte une baisse importante du niveau global pondéré des vibrations comparativement à l'autre. Il en va de même du côté du marteau antivibration lorsque l'on parle des marteaux A et B. Cependant, on se doit de noter que le niveau crête pondéré du côté du bélier antivibration est beaucoup plus faible que celui du bélier conventionnel (6 à 8 dB plus faible). Le facteur de crête étant un rapport de deux quantités ayant une relation commune entre elles, il représente peut-être un pauvre indicateur de la capacité des outils pour minimiser les chocs. Aussi devrait-on parler plutôt de la valeur instantanée crête d'accélération pour effectuer ce genre de comparaison. Les données des tableaux 10 et 11 ne devraient donc servir qu'à situer l'ordre de grandeur des accélérations instantanées pouvant se produire, celles-ci pouvant être de 4 à 10 fois plus élevées que l'accélération globale pondérée rapportée.

Somme toute, on constate que le facteur de crête est relativement peu élevé compte tenu du caractère percutant de ce type d'outil. Par contre, si l'on tient compte du fait que le niveau efficace d'accélération mesuré est relativement élevé, la valeur crête d'accélération obtenue par multiplication de ce facteur de crête devient importante à un instant donné.

Les facteurs de crête apparaissant dans les tableaux 12 et 13 (voir histogrammes dans l'annexe) sont évidemment beaucoup plus élevés que les premiers puisque aucune pondération n'est appliquée et que l'on considère les composantes vibratoires jusqu'à 5000 Hz. Le facteur de crête est de 2 à 3 fois plus élevé que les précédents et on enregistre des niveaux instantanés de vibrations pouvant atteindre 5000 ms^{-2} . On peut donc voir que des chocs importants sont produits.

4.4 Estimation de la période de latence pour le phénomène de Raynaud

La relation dose-effet apparaissant dans la norme ISO 5349 permet d'estimer le nombre d'années d'exposition nécessaire pour voir apparaître des symptômes associés au phénomène de Raynaud (i.e. période de latence). Ceci peut être calculé en connaissant le niveau d'accélération globale pondérée mesuré sur la poignée de l'outil et la durée d'exposition effective quotidienne pour des percentiles de population variant entre 10 et 50% de travailleurs susceptibles d'atteinte. Les tableaux 14 et 15 présentent ces résultats sur la période de latence en assumant une durée d'exposition effective d'une heure et en prenant les niveaux de vibrations apparaissant dans les tableaux 1 et 2.

Ces résultats indiquent que l'utilisation d'un marteau-riveteur conventionnel avec un bélier antivibration pourrait facilement amener une période de latence de l'ordre de 9 à 13 années à raison d'une heure d'utilisation par jour avant que des symptômes du phénomène de Raynaud apparaissent pour le 10^e percentile de population. Ce résultat vaut autant pour l'opérateur de marteau-riveteur que pour celui du bélier. Quant à l'utilisation d'outils conventionnels, on pourrait très bien compter une période de latence de 3 à 4 années pour l'opérateur de bélier et de 9 à 13 années pour l'opérateur de marteau-riveteur. L'utilisation d'outils strictement antivibrations donnerait une période de latence de l'ordre de 6 à 14 années du côté du bélier et de 10 à 17 années du côté du marteau, dépendant du type de marteau utilisé.

D'après une étude faite dans l'industrie aérospatiale en Suède [1], la période de latence réelle pour que 50% des travailleurs soient atteints pourrait être de l'ordre de 6 années. Les prévisions basées sur la relation dose-effet pour ce percentile de population sont de beaucoup supérieures à la période observée, particulièrement pour l'opérateur de marteau-riveteur. Il y a donc des doutes à savoir si la relation dose-effet s'applique bien dans le cas d'outils percutants comme le sont les marteaux-riveteurs.

5.0 CONCLUSIONS

L'exposition aux vibrations mains-bras résultant de l'opération de marteaux-riveteurs et de béliers lors de l'assemblage aérospatial dépend beaucoup des types d'outils utilisés. L'étude de certains modèles parmi les plus utilisés pour ce type d'opération a en effet démontré que l'utilisation d'un marteau antivibration commercialement disponible pouvait avoir des effets bénéfiques pour l'opérateur de marteau tout en rendant plus sévère l'exposition de l'opérateur de bélier. Par contre, l'utilisation d'un bélier antivibration commercialement disponible réduit considérablement l'exposition de l'opérateur de bélier, ce dernier étant généralement plus exposé que l'opérateur de marteau lors de l'assemblage aérospatial. Or, l'utilisation d'un marteau conventionnel de concert avec un bélier antivibration mènerait à une exposition semblable pour les deux opérateurs, ce qui signifierait une période de latence estimée à environ 9 à 13 années pour chacun des opérateurs à raison d'une durée quotidienne effective d'utilisation d'une heure par jour pour le 10^e percentile de population. Ceci contraste bien avec les 3 à 4 années de période de latence escomptée pour l'opérateur d'un bélier conventionnel et les 9 à 13 années pour l'opérateur d'un marteau conventionnel.

Quant à l'utilisation de tampons amortisseurs, ils ne semblent pas avoir une influence importante sur la diminution des vibrations mains-bras transmises aux opérateurs. Il apparaît évident que des niveaux instantanés crête très élevés d'accélération sont engendrés. À première vue, le

facteur de crête apparaît comme étant peu élevé, ce qui ne signifie pas que des niveaux instantanés crête de vibrations de grandes intensités ne sont pas produits, puisqu'on les obtient en multipliant le facteur de crête par un niveau efficace de vibration déjà relativement élevé.

Les mesures de vibrations effectuées au poignet des opérateurs indiquent des niveaux de vibrations bien différents de ceux mesurés sur la poignée. Cependant, sensiblement les mêmes conclusions sont obtenues en utilisant ces résultats. Le degré de cohérence entre les deux méthodes de mesure semble bon, bien qu'il soit difficile d'établir ce que signifient concrètement les niveaux de vibrations mesurés au poignet puisque aucune relation dose-effet n'existe basée sur de telles mesures.

Dans les directions transversales, les niveaux de vibrations mesurés sur la poignée des outils sont peu élevés en comparaison avec les vibrations mesurées selon l'axe de percussion. Ceci n'est pas le cas pour les vibrations mesurées au poignet où l'amplitude des vibrations transversales peut devenir très significative, dépendant de l'orientation de l'avant-bras, particulièrement pour l'opérateur de bélier.

BIBLIOGRAPHIE

1. Dandanell, R., Engstrom, K. «Vibration Measurement and Analysis of Percussion Tools such as Riveting Hammers and Bucking Bars», U.K. Informal Group Meeting on Human Response to Vibration, Heriot-Watt University, Edinburgh, septembre 1984, p. 13-23.
2. Taylor, W., Brammer, A.J. «Vibration Effects on the Hand and Arm in Industry : An introduction and Review» dans *Vibration Effects on the Hand and Arm in Industry* par A.J. Brammer et W. Taylor, John Wiley & Sons, 1982, p. 1-12.
3. Dupuis, H., Schafer, N. «Effects of Impulse Vibration on the Hand-Arm System», *Scand J. Work Environ Health*, Vol. 12, No. 4, 1986, p. 320-322.
4. Farkkila, M., Starck, J. et coll. «Vasospastic Symptom Caused by Assymmetrical Vibration Exposure of the Upper Extremities to a Pneumatic Hammer», *Scand J. Work Environ Health*, Vol. 4, 1978, p. 330-335.
5. Norme internationale ISO 5349. «Vibrations mécaniques-Principes directeurs pour le mesurage et l'évaluation de l'exposition des individus aux vibrations transmises par la main», Première édition 1986-05-15.
6. Starck, J., Pyykko, I. «Impulsiveness of Vibration as an Additional Factor in the Hazards Associated with Hand-Arm Vibration», *Scand J. Work Environ Health*, Vol. 12, No. 4, 1986, p. 323-326.
7. Dandanell, R., Engstrom, K. «Vibration from Riveting Tools in the Frequency Range 6 Hz-10 MHz and Raynaud's Phenomenon», *Scand J. Work Environ Health*, Vol. 12, No. 4, 1986, p. 338-342.
8. Starck, J., Pekkarinen, J., Chun, L.C. «Transmission of Vibration from Tool Handle to Wrist and to Head», *Kurume University Symp. «Vibration Stress and the Autonomic Nervous System»*, mai 1989, 34 p.
9. Pekkarinen, J., Starck, J., Pyykko, I. «High-Speed Digital Method to Measure Impulsive Hand-Arm Vibration», *Proc. 3rd International Symposium of the ISSA*, Vienne, avril 1989, p. 47-50.
10. Amram, M., Masson, P., Brooks, G., Boileau, P.-É. «A New Vacuum-Activated Device to Reduce the Noise and the Vibration in Riveting Process», *Canadian Acoustical Association Symposium*, Vancouver, C.-B., 6-9 octobre 1992.

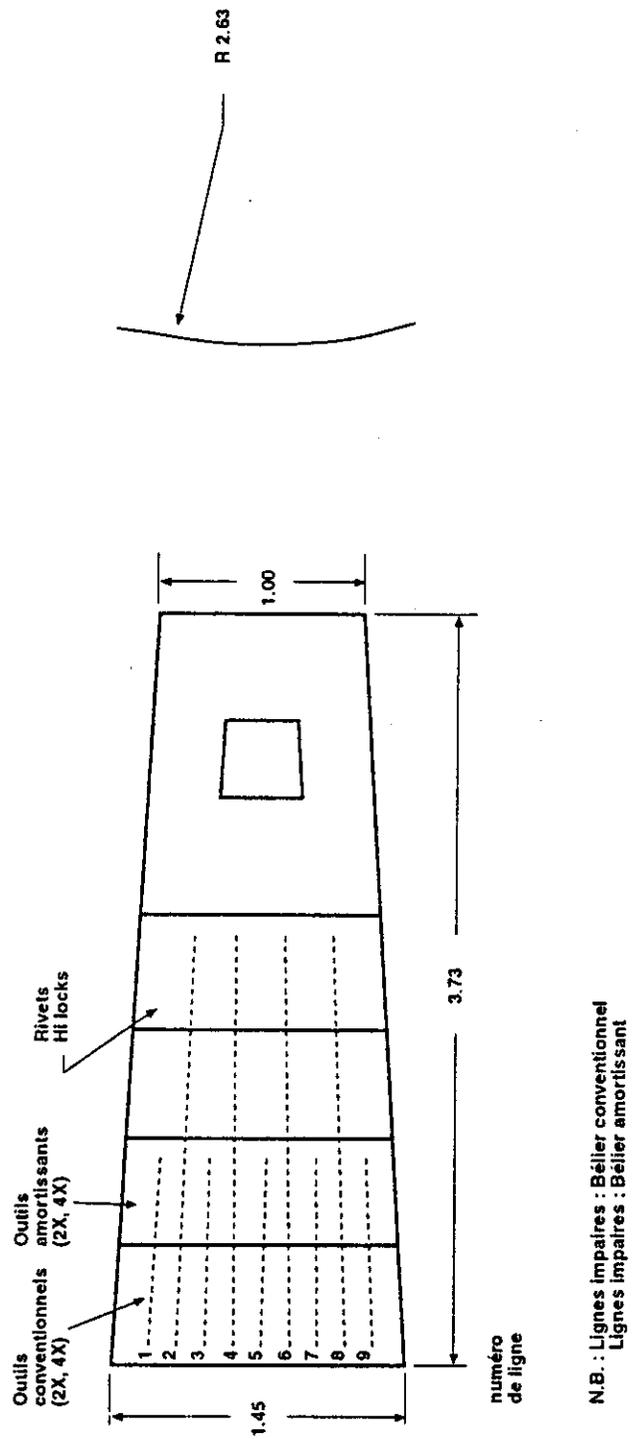


Figure 1: Schéma du montage expérimental

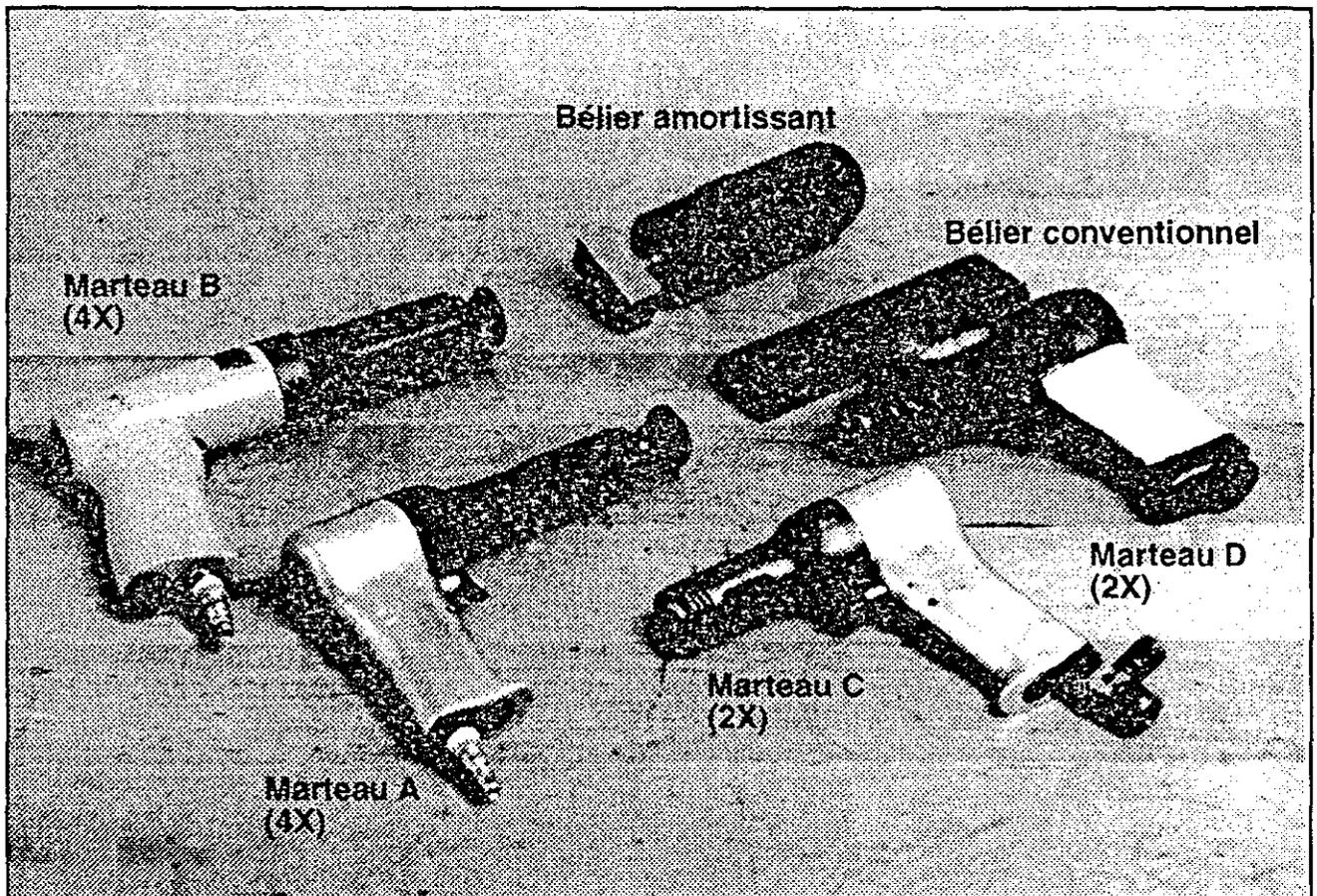


Figure 2 : Marteaux-riveteurs et béliers utilisés

Tampons
amortisseurs

Pompe à vide

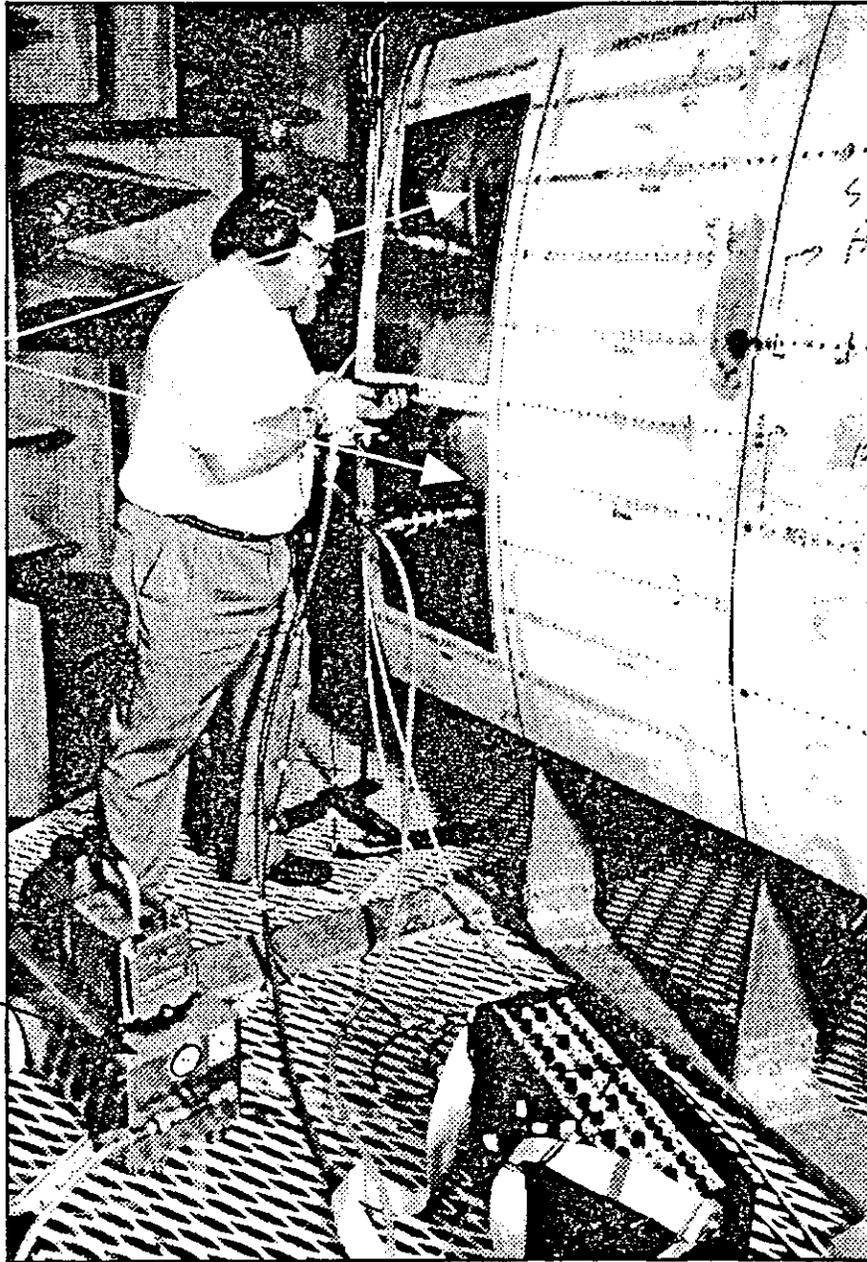


Figure 3: Installation des tampons amortisseurs sur la structure.



Figure 4 : Montage et orientation des accéléromètres sur la poignée et au poignet du côté du marteau-riveteur

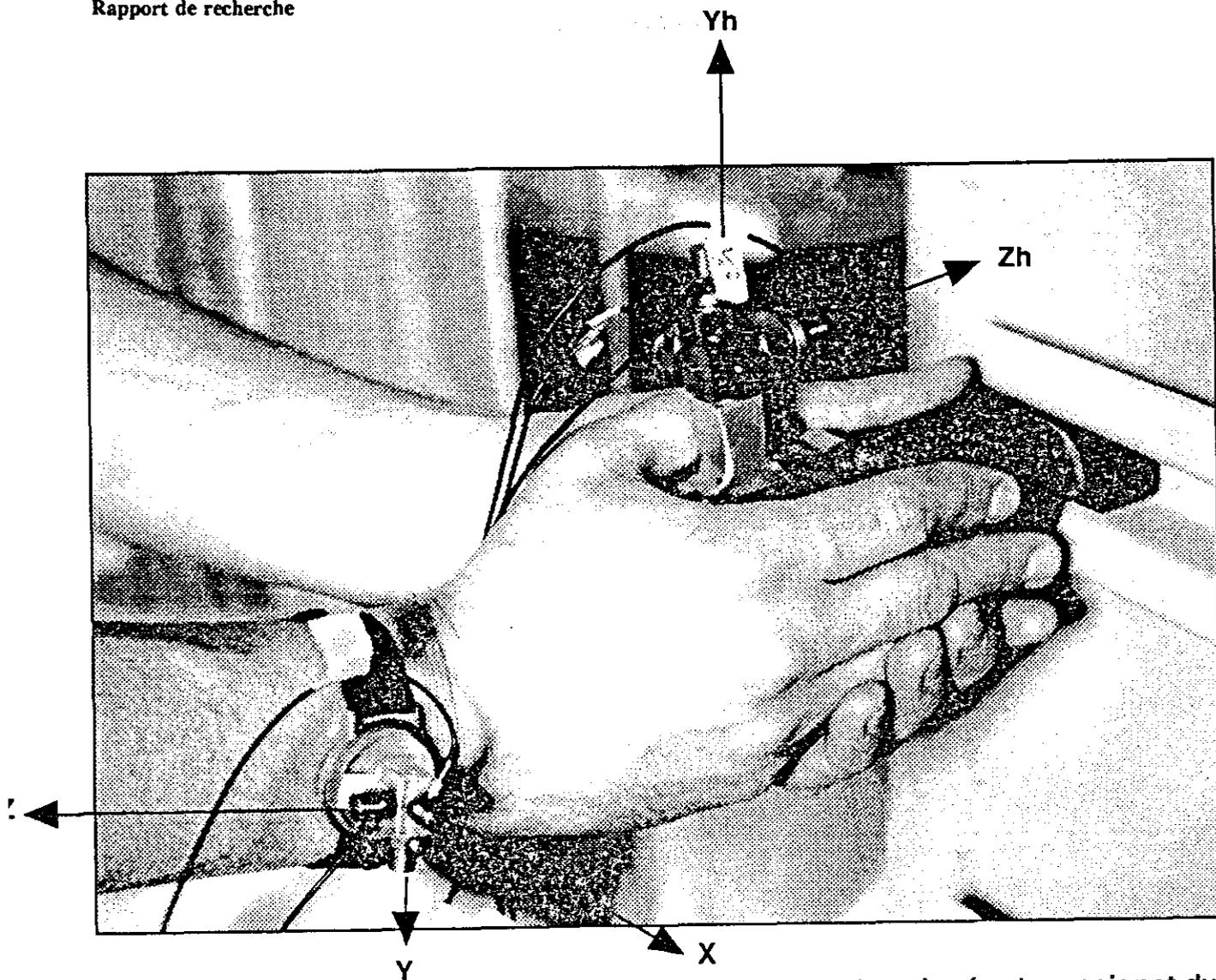


Figure 5 : Montage et orientation des accéléromètres sur la poignée et au poignet du côté du bélier

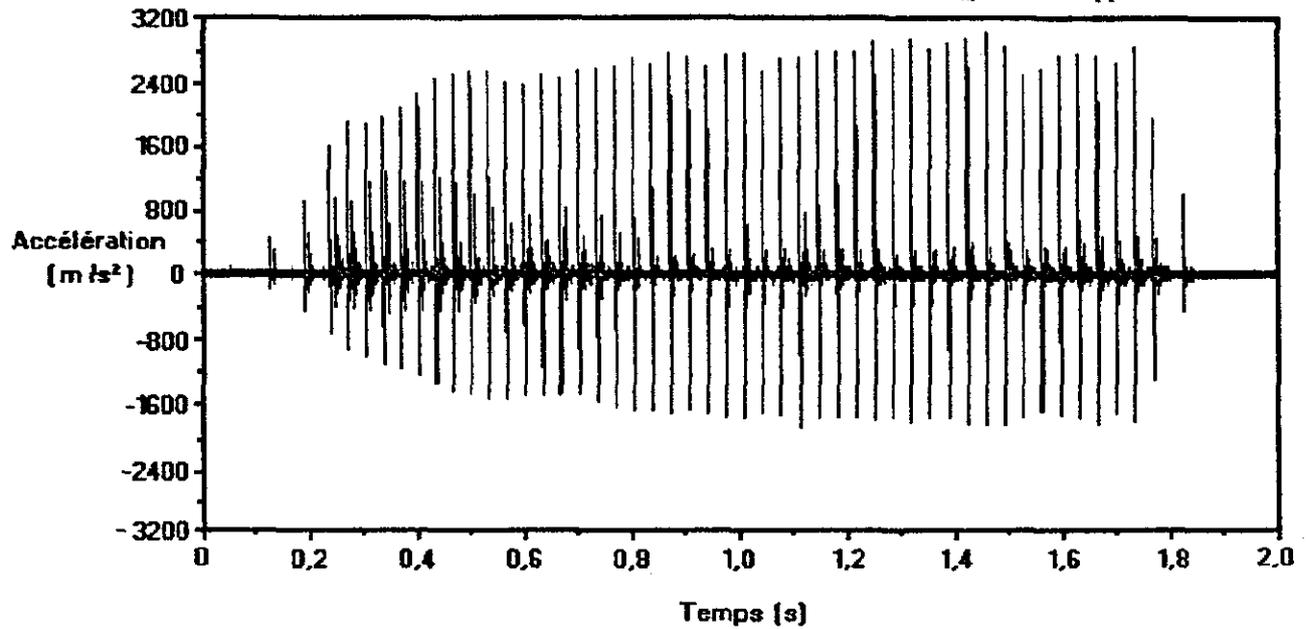


Figure 6a. Signal temporel de l'accélération mesurée sur la poignée d'un marteau-riveteur lors de la pose d'un rivet.

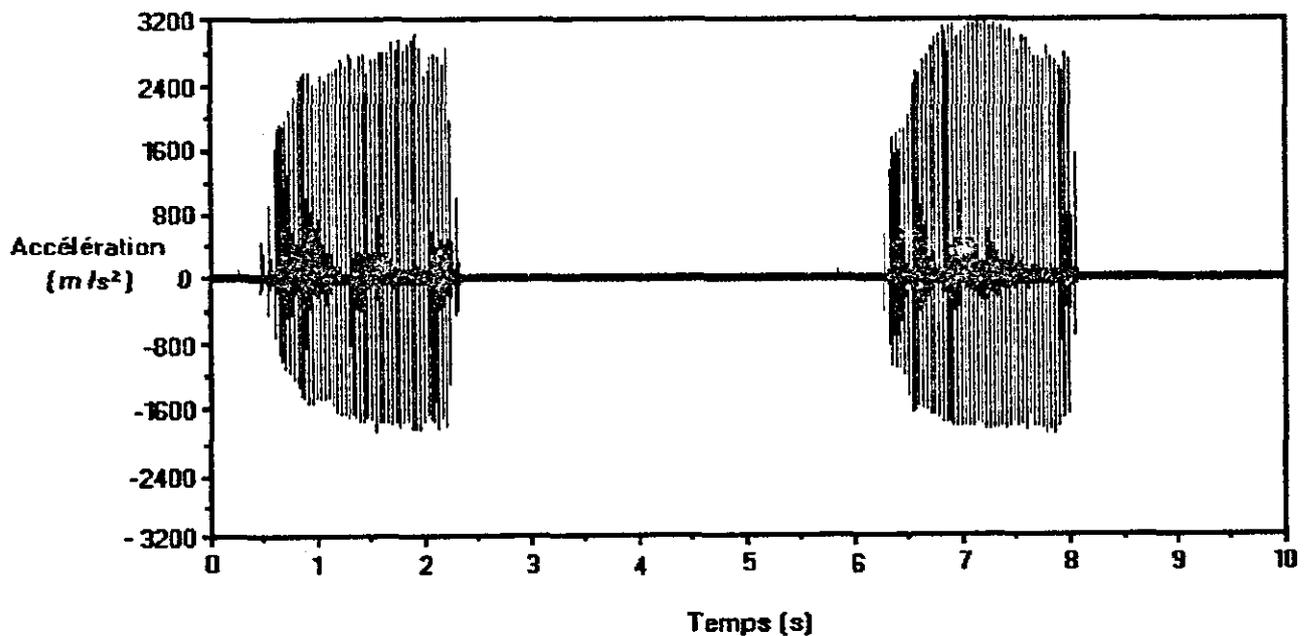


Figure 6b. Signal temporel de l'accélération mesurée sur la poignée d'un marteau-riveteur lors de la pose de deux rivets.

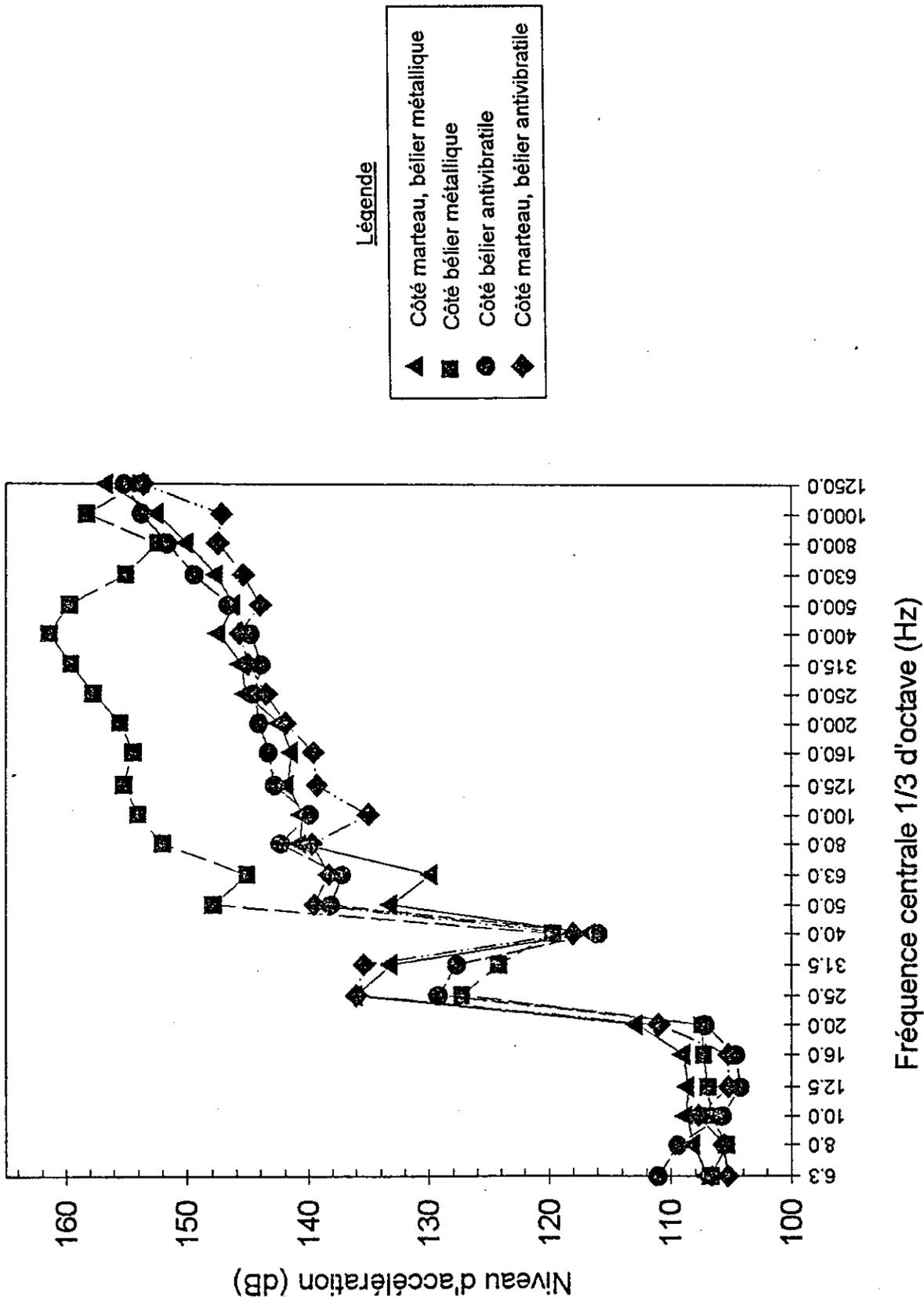


Figure 7. Spectres non pondérés des vibrations en bandes de tiers d'octave (6.3 - 1250 Hz) pour le marteau A (poignée, direction z_0).

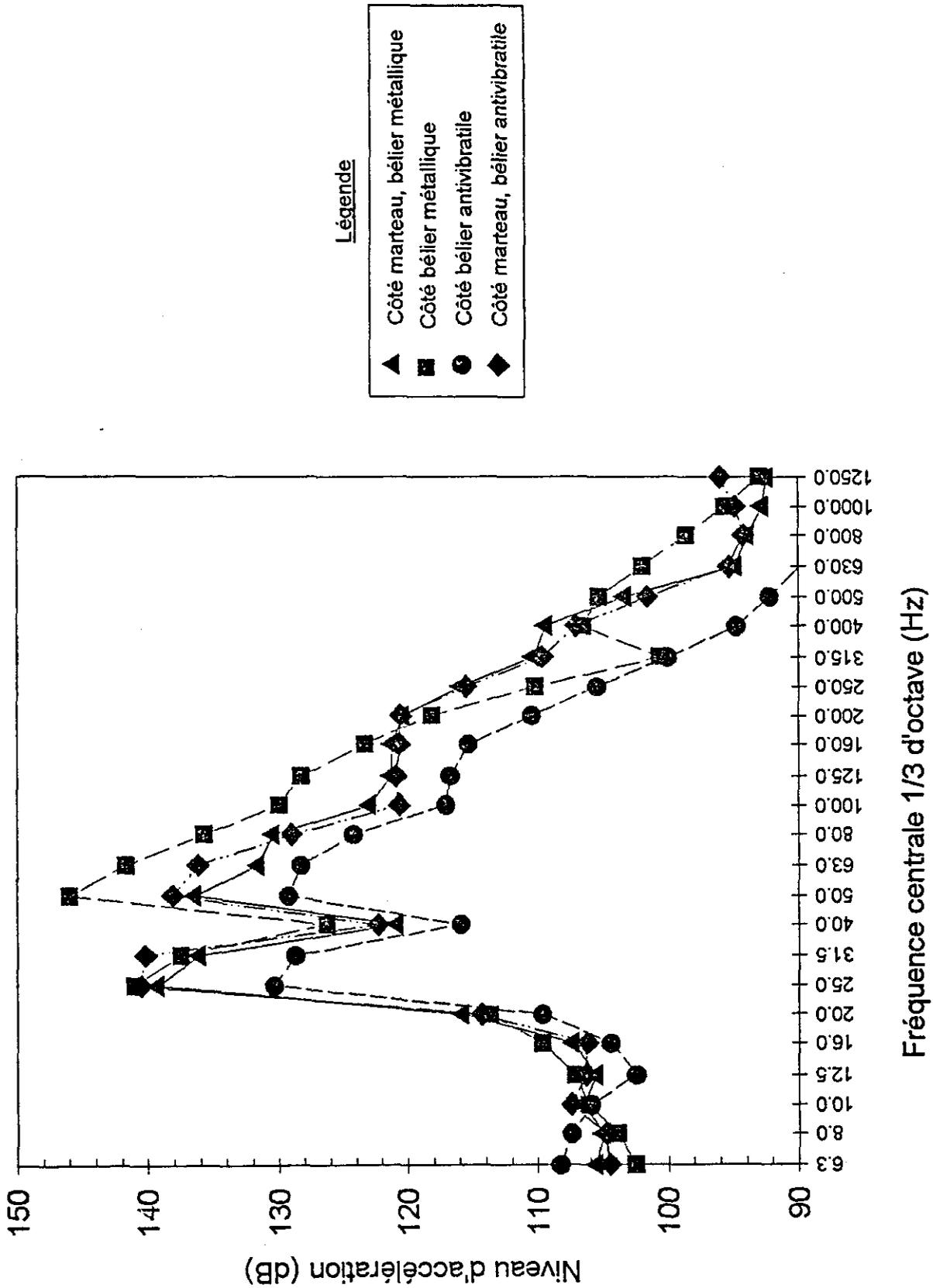


Figure 8. Spectres non pondérés des vibrations en bandes de tiers d'octave (6.3 - 1250 Hz) pour le marteau A (poignet, direction z).

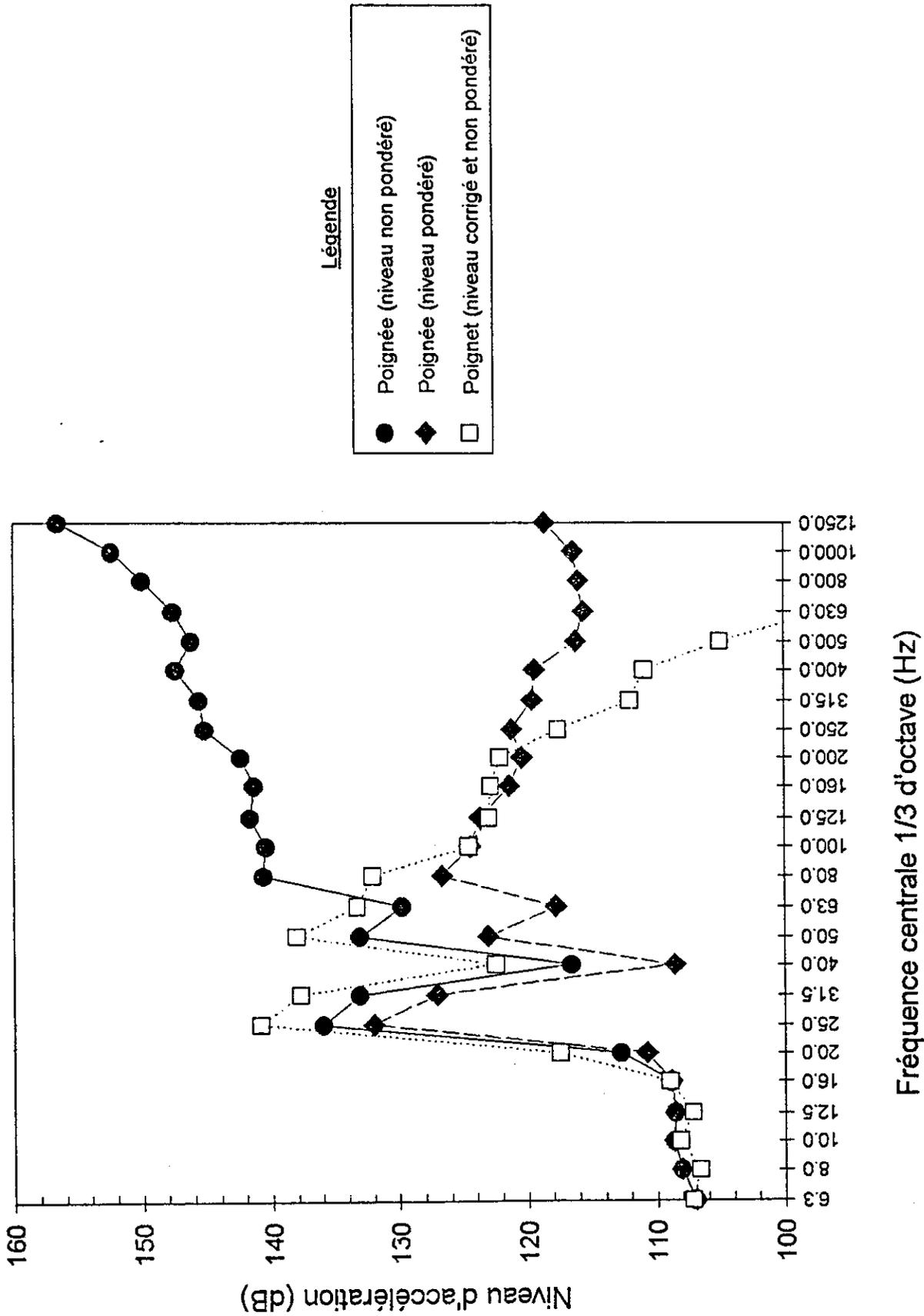


Figure 9. Comparaison des spectres pondéré et non pondéré sur la poignée du marteau A avec le spectre non pondéré au poignet de l'opérateur de marteau.

Tableau 1. Accélération globale pondérée sur la poignée des béliers (direction z_h) [6.3 - 1250 Hz]

Marteau-riveteur	Sans tampons		Avec tampons	
	Bélier conventionnel	Bélier antivibration $a_{h,w}$ (ms^{-2})	Bélier conventionnel	Bélier antivibration $a_{h,w}$ (ms^{-2})
A	19.9 ± 0.9	6.0 ± 1.2	18.0 ± 1.0	4.3 ± 1.2
B	28.0 ± 2.0	10.6 ± 1.4	25.0 ± 2.0	10.0 ± 2.0
C	15.0 ± 1.5	4.6 ± 1.0	14.0 ± 0.7	2.7 ± 0.4
D	14.9 ± 1.5	4.2 ± 0.8	13.0 ± 0.7	4.2 ± 0.9

Tableau 2. Accélération globale pondérée sur la poignée des marteaux-riveteurs (direction z_h) [6.3 - 1250 Hz]

Marteau-riveteur	Sans tampons		Avec tampons	
	Bélier conventionnel	Bélier antivibration	Bélier conventionnel	Bélier antivibration
	$a_{h,w}$ (ms^{-2})		$a_{h,w}$ (ms^{-2})	
A	6.5 ± 0.4	7.0 ± 0.7	5.7 ± 0.2	5.8 ± 0.4
B	5.1 ± 0.4	3.6 ± 0.4	5.2 ± 1.4	5.1 ± 1.5
C	4.4 ± 0.3	4.8 ± 0.5	3.9 ± 0.4	3.3 ± 0.5
D	5.0 ± 0.4	5.7 ± 0.7	4.4 ± 0.2	3.9 ± 1.1

Tableau 3. Accélération globale non pondérée sur la poignée du bélier (direction z_h) [6.3 - 5000 Hz]

Marteau-riveteur	Sans tampons		Avec tampons	
	Bélier conventionnel	Bélier antivibration a_h (ms^{-2})	Bélier conventionnel	Bélier antivibration a_h (ms^{-2})
A	288 ± 15 (400 Hz)*	115 ± 25 (1250 Hz)	268 ± 18 (315 Hz)	81 ± 15 (1250 Hz)
B	324 ± 20 (400 Hz)	227 ± 37 (1250 Hz)	357 ± 20 (500 Hz)	191 ± 25 (1250 Hz)
C	257 ± 20 (315 Hz)	75 ± 8 (1250 Hz)	217 ± 17 (315 Hz)	71 ± 15 (1250 Hz)
D	260 ± 20 (400 Hz)	82 ± 14 (1250 Hz)	224 ± 12 (400 Hz)	91 ± 21 (1250 Hz)

* Valeur entre parenthèses : fréquence dominante du spectre.

Tableau 4. Accélération globale non pondérée sur la poignée du marteau-riveteur (direction z_h) [6.3 - 5000 Hz]

Marteau-riveteur	Sans tampons		Avec tampons	
	Bélier conventionnel	Bélier antivibration	Bélier conventionnel	Bélier antivibration
	a_h (ms ⁻²)		a_h (ms ⁻²)	
A	126 ± 7 (1250 Hz)*	96 ± 6 (1250 Hz)	170 ± 15 (1600 Hz)	77 ± 6 (1600 Hz)
B	68 ± 14 (1250 Hz)	51 ± 15 (1000 Hz)	53 ± 10 (1250 Hz)	61 ± 12 (1600 Hz)
C	143 ± 13 (120 Hz)	100 ± 16 (2500 Hz)	141 ± 16 (1250 Hz)	90 ± 6 (1250 Hz)
D	114 ± 16 (800 Hz)	76 ± 6 (800 Hz)	136 ± 17 (1000 Hz)	79 ± 6 (1000 Hz)

* Valeur entre parenthèses : fréquence dominante du spectre.

Tableau 5. Accélération globale non pondérée mesurée au poignet de l'opérateur de bélier (direction z) [6.3 - 1250 Hz]

Marteau-riveteur	Sans tampons		Avec tampons	
	Bélier conventionnel	Bélier antivibration a_h (ms^{-2})	Bélier conventionnel	Bélier antivibration a_h (ms^{-2})
A	28 ± 2	6.2 ± 0.9	19 ± 4	5.1 ± 0.9
B	33 ± 7	13.9 ± 1.5	40 ± 5	14.1 ± 3.7
C	10.7 ± 1.7	5.9 ± 2.0	11.6 ± 3.2	3.7 ± 0.5
D	13.0 ± 3.7	5.8 ± 1.6	14.6 ± 2.4	5.7 ± 1.2

Tableau 6. Accélération globale non pondérée au poignet de l'opérateur du marteau-riveteur (direction z) [6.3 - 1250 Hz]

Marteau-riveteur	Sans tampons		Avec tampons	
	Bélier conventionnel	Bélier antivibration	Bélier conventionnel	Bélier antivibration
	a_h (ms^{-2})		a_h (ms^{-2})	
A	14.2 ± 2.1	18.4 ± 1.9	12.9 ± 1.3	17.9 ± 1.8
B	9.3 ± 1.8	9.0 ± 1.1	12.2 ± 1.9	12.7 ± 3.9
C	16.5 ± 2.2	28.1 ± 2.9	16.5 ± 1.7	14.3 ± 2.9
D	19.4 ± 2.2	25.4 ± 3.6	9.0 ± 1.2	14.9 ± 2.5

Tableau 7. Vibrations transversales (axes x_h et y_h) pondérées mesurées sur la poignée des outils [6.3 - 1250 Hz]

Marteau-riveteur	Axe	Côté marteau		Côté bélier	
		Bélier conventionnel	Bélier antivibration	Bélier conventionnel	Bélier antivibration
		$a_{h,w}$ (ms^{-2})		$a_{h,w}$ (ms^{-2})	
A	y_h	2.4 ± 0.3	2.0 ± 0.2	3.8 ± 0.7	5.7 ± 1.2
	x_h	2.0 ± 0.2	1.7 ± 0.2	4.9 ± 0.3	1.7 ± 0.2
B	y_h	2.2 ± 0.4	1.8 ± 0.4	8.2 ± 1.6	6.3 ± 2.0
	x_h	2.6 ± 0.5	1.7 ± 0.4	5.8 ± 0.8	3.6 ± 0.6

Tableau 8. Vibrations transversales (axes x et y) non pondérées mesurées au poignet des opérateurs [6.3 - 1250 Hz]

Marteau-riveteur	Axe	Côté marteau		Côté bélier	
		Bélier conventionnel	Bélier antivibration	Bélier conventionnel	Bélier antivibration
		a_h (ms ⁻²)		a_h (ms ⁻²)	
A	y	9.5 ± 1.1	12.2 ± 1.4	10.9 ± 2.2	9.6 ± 1.8
	x	7.9 ± 1.9	11.4 ± 2.0	8.5 ± 1.5	5.8 ± 1.6
B	y	11.1 ± 1.0	5.6 ± 0.9	8.6 ± 2.7	9.2 ± 1.9
	x	6.6 ± 0.9	6.6 ± 1.4	-	15.1 ± 4.5

Tableau 9a. Somme vectorielle des vibrations pondérées sur la poignée des outils

Marteau-riveteur	Côté marteau		Côté bélier	
	Bélier conventionnel a (ms ⁻²)	Bélier antivibration a (ms ⁻²)	Bélier conventionnel a (ms ⁻²)	Bélier antivibration a (ms ⁻²)
A	7.2	7.5	20.8	8.4
B	6.1	4.4	29.7	12.8

Tableau 9b. Somme vectorielle des vibrations non pondérées au poignet

Marteau-riveteur	Côté marteau		Côté bélier	
	Bélier conventionnel a (ms ⁻²)	Bélier antivibration a (ms ⁻²)	Bélier conventionnel a (ms ⁻²)	Bélier antivibration a (ms ⁻²)
A	18.8	24.8	38.5	12.8
B	15.9	12.5	-	22.5

Tableau 10. Facteur de crête mesuré à partir des niveaux pondérés des vibrations sur la poignée des béliers (direction z_h) [6.3 - 1250 Hz]

Marteau-riveteur	Sans tampons		Avec tampons	
	Bélier conventionnel	Bélier antivibration	Bélier conventionnel	Bélier antivibration
A	6.0	7.0	6.3	8.7
B	5.7	8.3	5.2	7.0
C	5.9	7.7	4.9	10.3
D	5.5	10.5	5.3	7.0

Tableau 11. Facteur de crête mesuré à partir des niveaux pondérés des vibrations sur la poignée des marteaux-riveteurs (direction z_n) [6.3 - 1250 Hz]

Marteau-riveteur	Sans tampons		Avec tampons	
	Bélier conventionnel	Bélier antivibration	Bélier conventionnel	Bélier antivibration
A	4.8	5.6	5.0	6.6
B	4.4	6.5	6.4	6.2
C	5.7	4.8	7.1	5.2
D	5.8	5.5	6.9	8.5

Tableau 12. Facteur de crête mesuré à partir des niveaux non pondérés de vibrations sur la poignée des béliers (direction z_h) [6.3 - 5000 Hz]

Marteau-riveteur	Sans tampons		Avec tampons	
	Bélier conventionnel	Bélier antivibration	Bélier conventionnel	Bélier antivibration
A	13.2	19.9	16.5	19.8
B	14.9	17.9	9.3	15.4
C	13.5	18.6	11.8	14.7
D	11.2	17.8	10.5	12.8

Tableau 13. Facteur de crête à partir des niveaux non pondérés de vibrations sur la poignée des marteaux-riveteurs (direction_n) [6.3 - 5000 Hz]

Marteau-riveteur	Sans tampons		Avec tampons	
	Bélier conventionnel	Bélier antivibration	Bélier conventionnel	Bélier antivibration
A	18.4	15.6	16.2	14.7
B	19.2	19.4	25.2	20.2
C	19.7	23.7	10.2	9.7
D	11.6	14.9	12.3	19.2

Tableau 14. Période de latence estimée pour les 10^e et 50^e percentiles du côté de l'opérateur de bélier

Marteau-riveteur	Sans tampons amortisseurs				Avec tampons amortisseurs			
	Bélier conventionnel (années)		Bélier antivibration (années)		Bélier conventionnel (années)		Bélier antivibration (années)	
	10 %	50 %	10 %	50 %	10 %	50 %	10 %	50 %
A	3.0	6.8	10.0	22.4	3.3	7.5	14.0	> 25.0
B	2.1	4.8	5.7	12.7	2.4	5.4	6.0	13.4
C	4.0	9.0	13.1	> 25.0	4.3	9.6	22.2	> 25.0
D	4.0	9.0	14.3	> 25.0	4.6	10.3	14.3	> 25.0

Tableau 15. Période de latence estimée pour les 10^e et 50^e percentiles du côté de l'opérateur de marteau-riveteur

Marteau-riveteur	Sans tampons amortisseurs				Avec tampons amortisseurs			
	Bélier conventionnel		Bélier antivibration		Bélier conventionnel		Bélier antivibration	
	(années)							
	10 %	50 %	10 %	50 %	10 %	50 %	10 %	50 %
A	9.2	20.6	8.6	19.3	10.5	23.5	10.4	23.3
B	11.8	> 25.0	16.7	> 25.0	11.6	> 25.0	11.8	> 25.0
C	13.6	> 25.0	12.5	> 25.0	15.4	> 25.0	18.2	> 25.0
D	12.0	> 25.0	10.5	23.5	13.6	> 25.0	15.4	> 25.0

REPRÉSENTATION DES RÉSULTATS SOUS FORME D'HISTOGRAMMES

ANNEXE

LÉGENDE

A1	Marteau A, bélier conventionnel, sans tampons
A2	Marteau A, bélier antivibration, sans tampons
B1	Marteau B, bélier conventionnel, sans tampons
B2	Marteau B, bélier antivibration, sans tampons
C1	Marteau C, bélier conventionnel, sans tampons
C2	Marteau C, bélier antivibration, sans tampons
D1	Marteau D, bélier conventionnel, sans tampons
D2	Marteau D, bélier antivibration, sans tampons
A1P	Marteau A, bélier conventionnel, avec tampons
A2P	Marteau A, bélier antivibration, avec tampons
B1P	Marteau B, bélier conventionnel, avec tampons
B2P	Marteau B, bélier antivibration, avec tampons
C1P	Marteau C, bélier conventionnel, avec tampons
C2P	Marteau C, bélier antivibration, avec tampons
D1P	Marteau D, bélier conventionnel, avec tampons
D2P	Marteau D, bélier antivibration, avec tampons

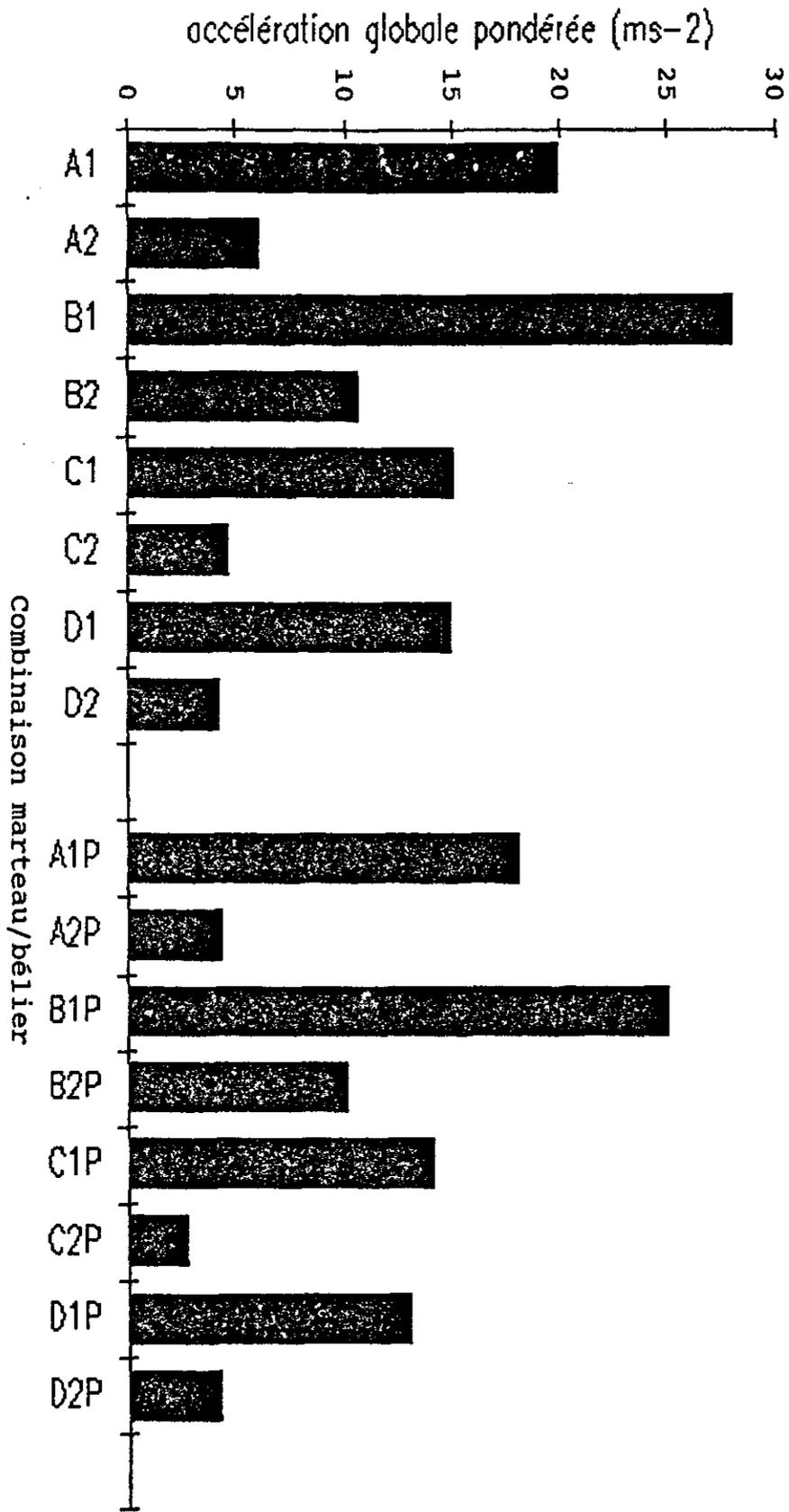


Tableau 1. Accélération globale pondérée sur la poignée des béliers (zh) 6.3-1250 Hz.

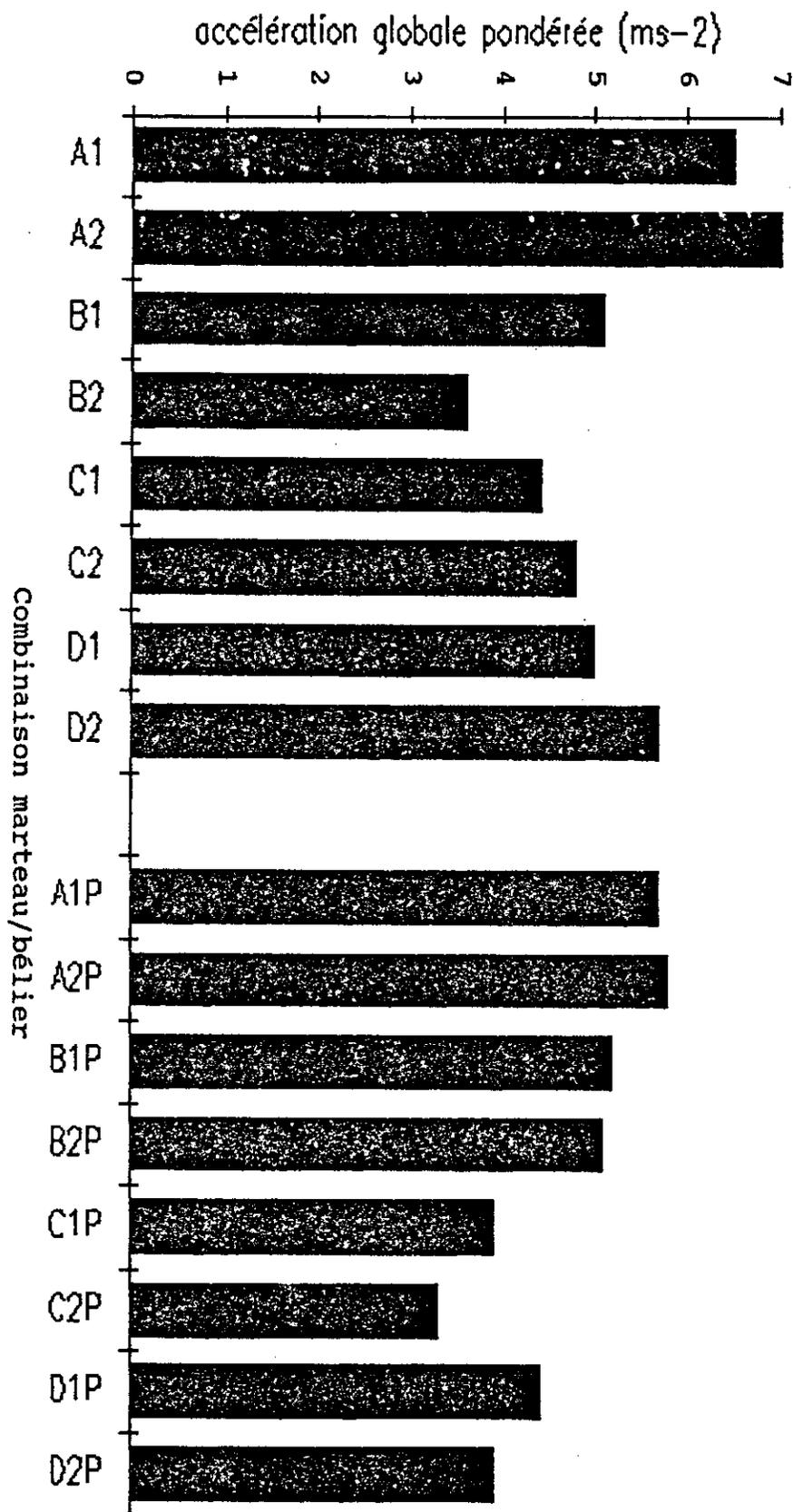


Tableau 2. Accélération globale pondérée sur la poignée des marteaux (zh) 6.3-1250 Hz.

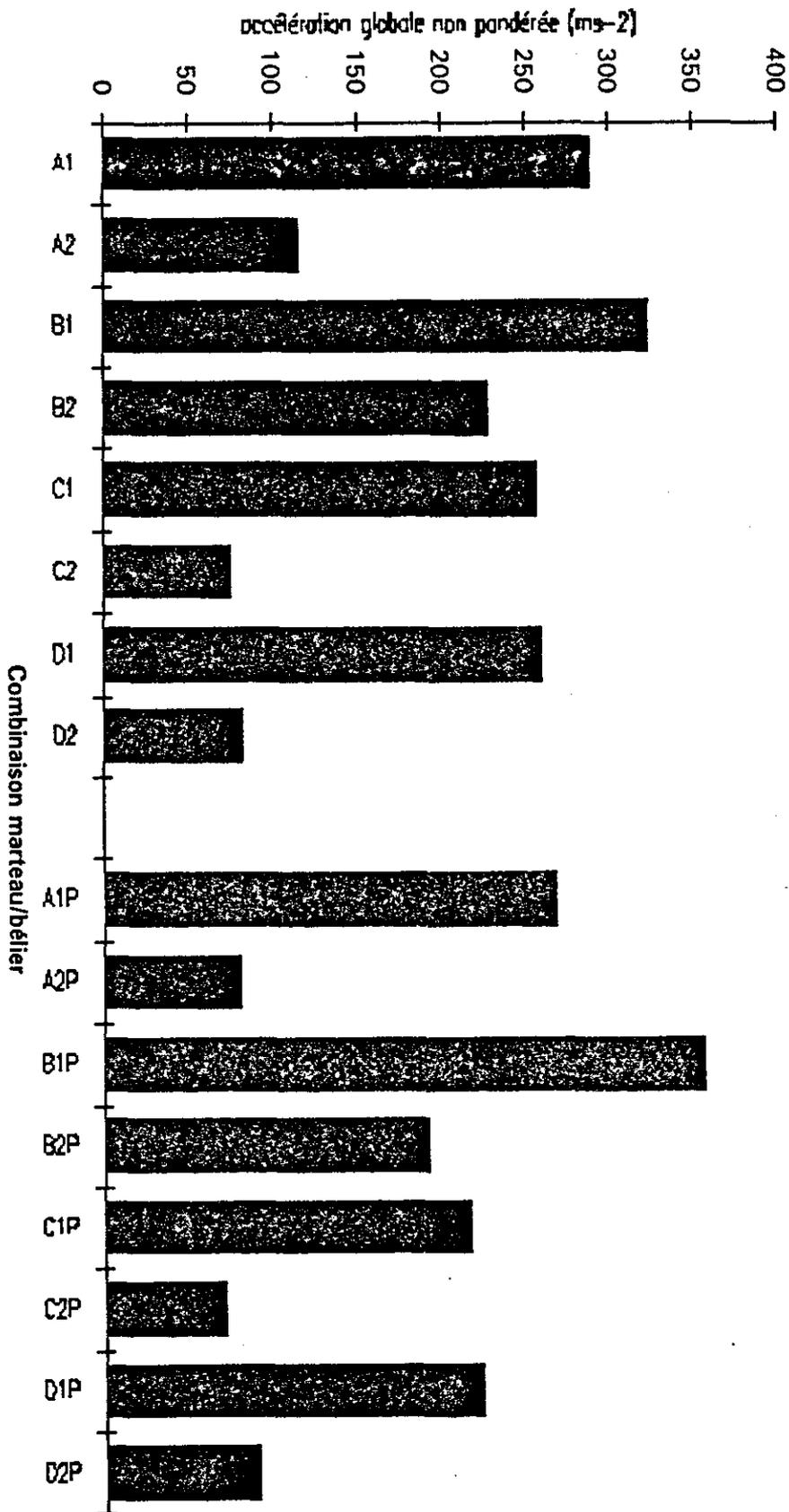


Tableau 3. Accélération globale non pondérée sur la poignée du bélier (zh) 6.3-5000 Hz.

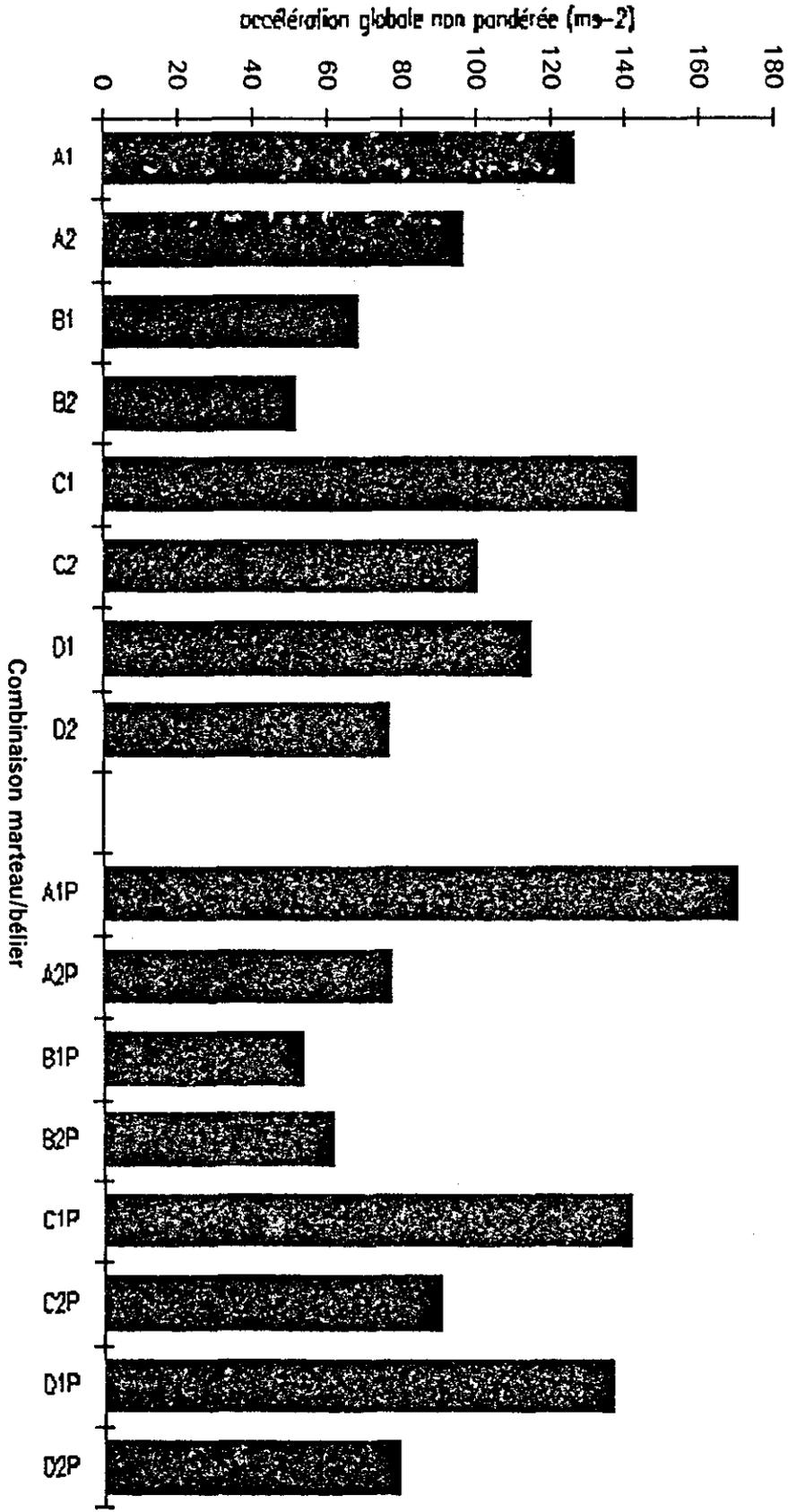


Tableau 4. Accélération globale non pondérée sur la poignée du marteau (zh) 6.3-5000 Hz.

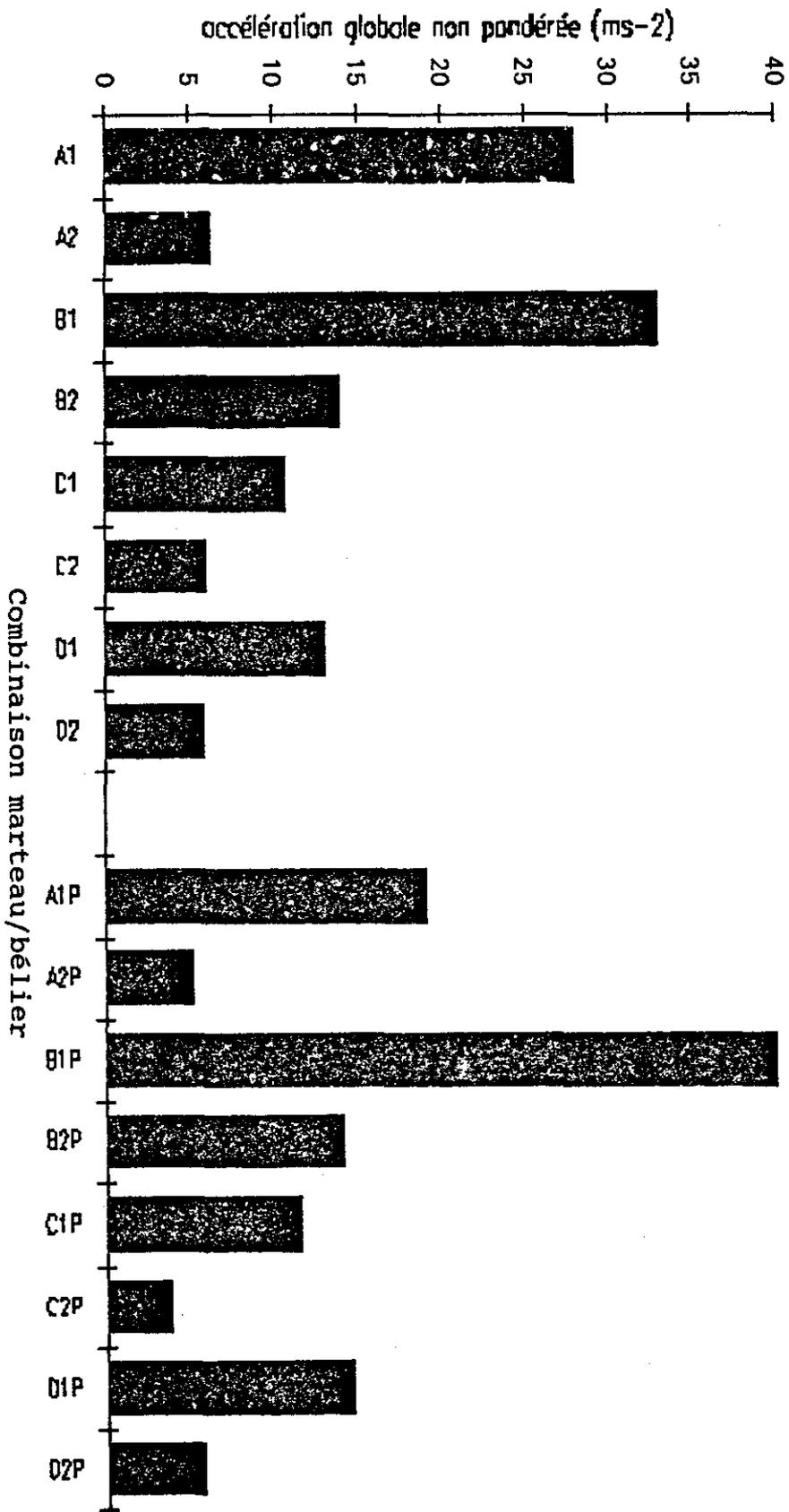


Tableau 5. Accélération globale non pondérée au poignet de l'opérateur de bélier (zh) 6.3-1250 Hz.

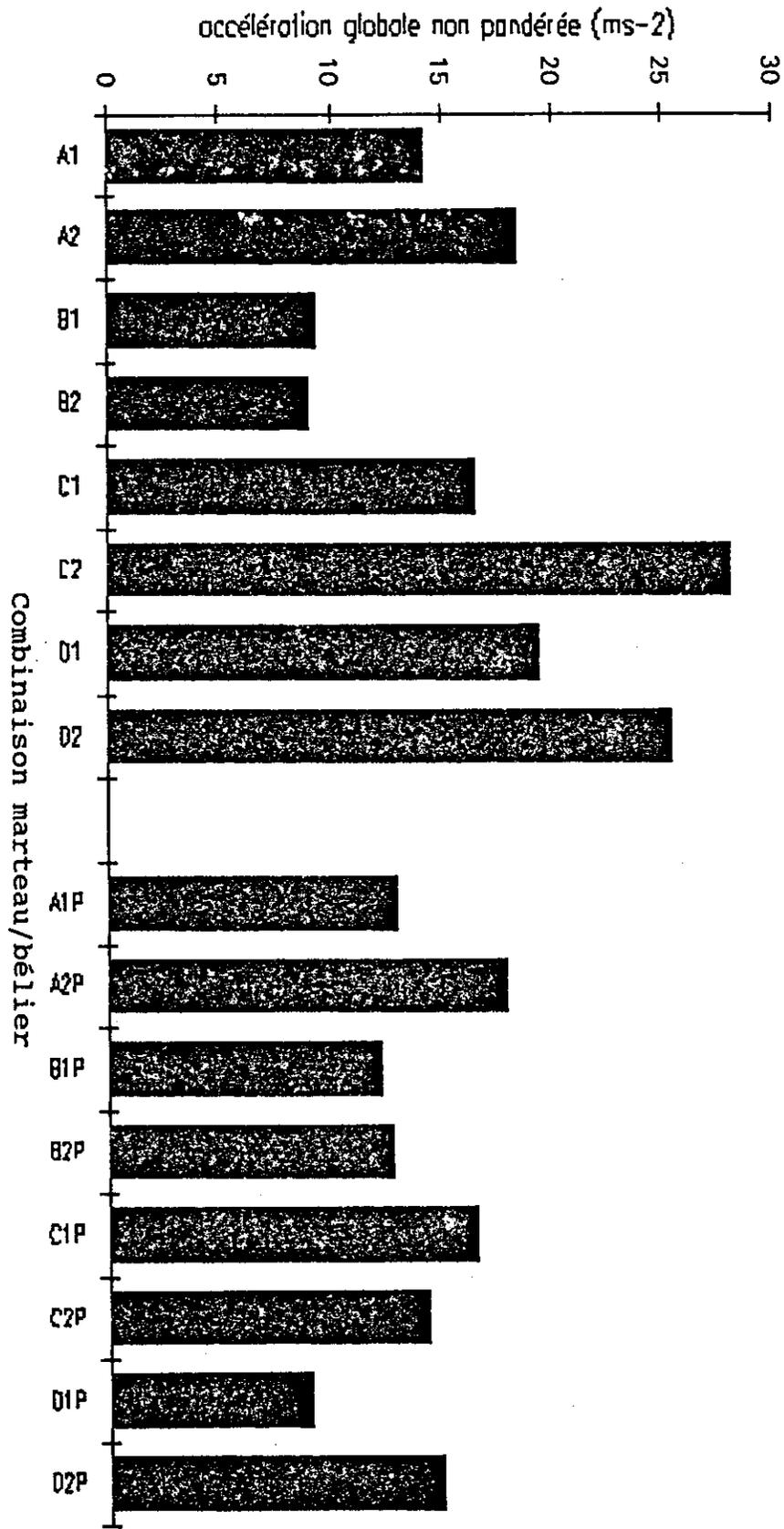
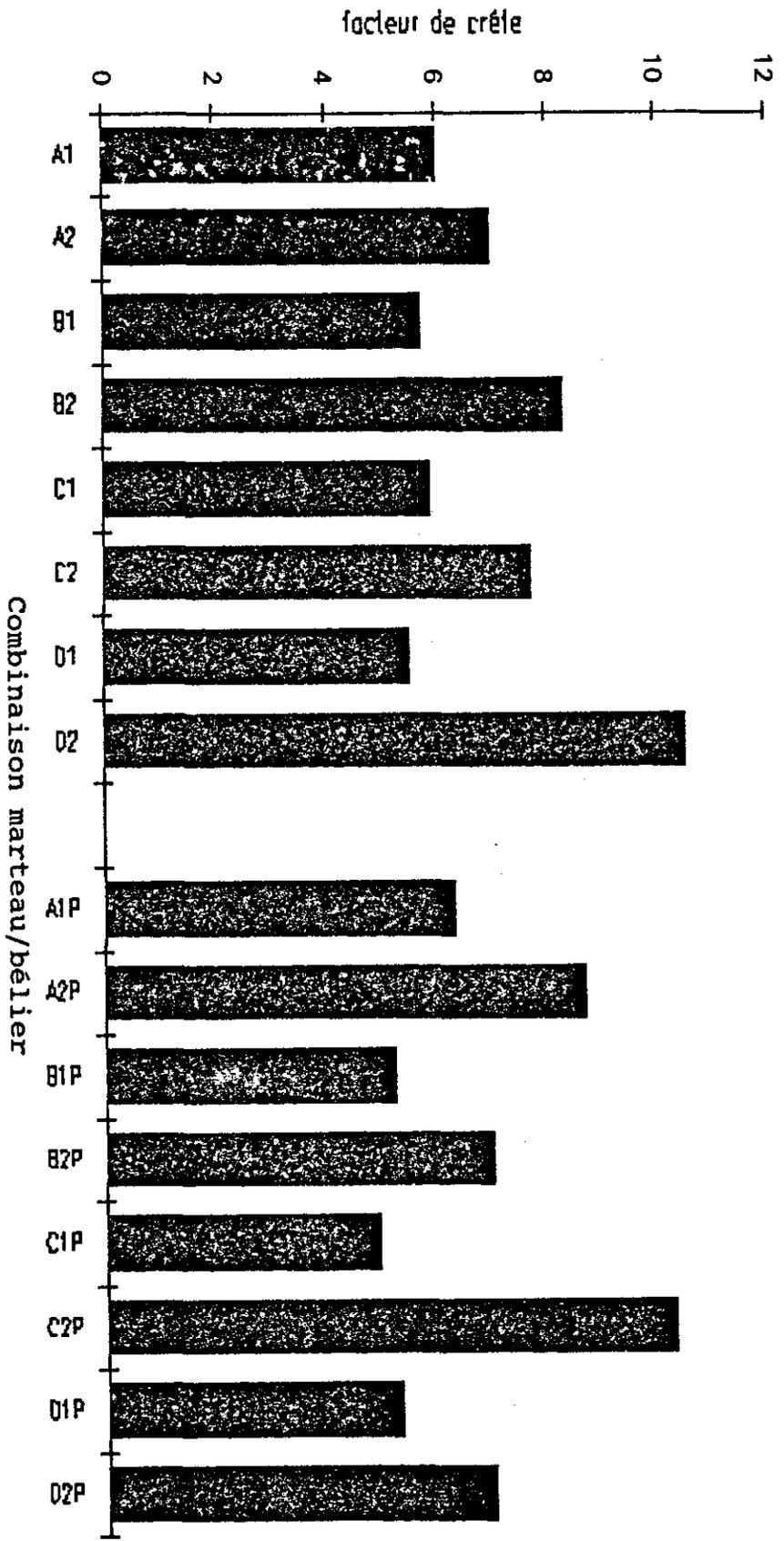


Tableau 6. Accélération globale non pondérée au poignet de l'opérateur de marteau (zh) 6.3-1250 Hz.

Tableau 10. Facteur de crête mesuré à partir des vibrations pondérées sur la poignée des béliers (zh) 6.3-1250 Hz.



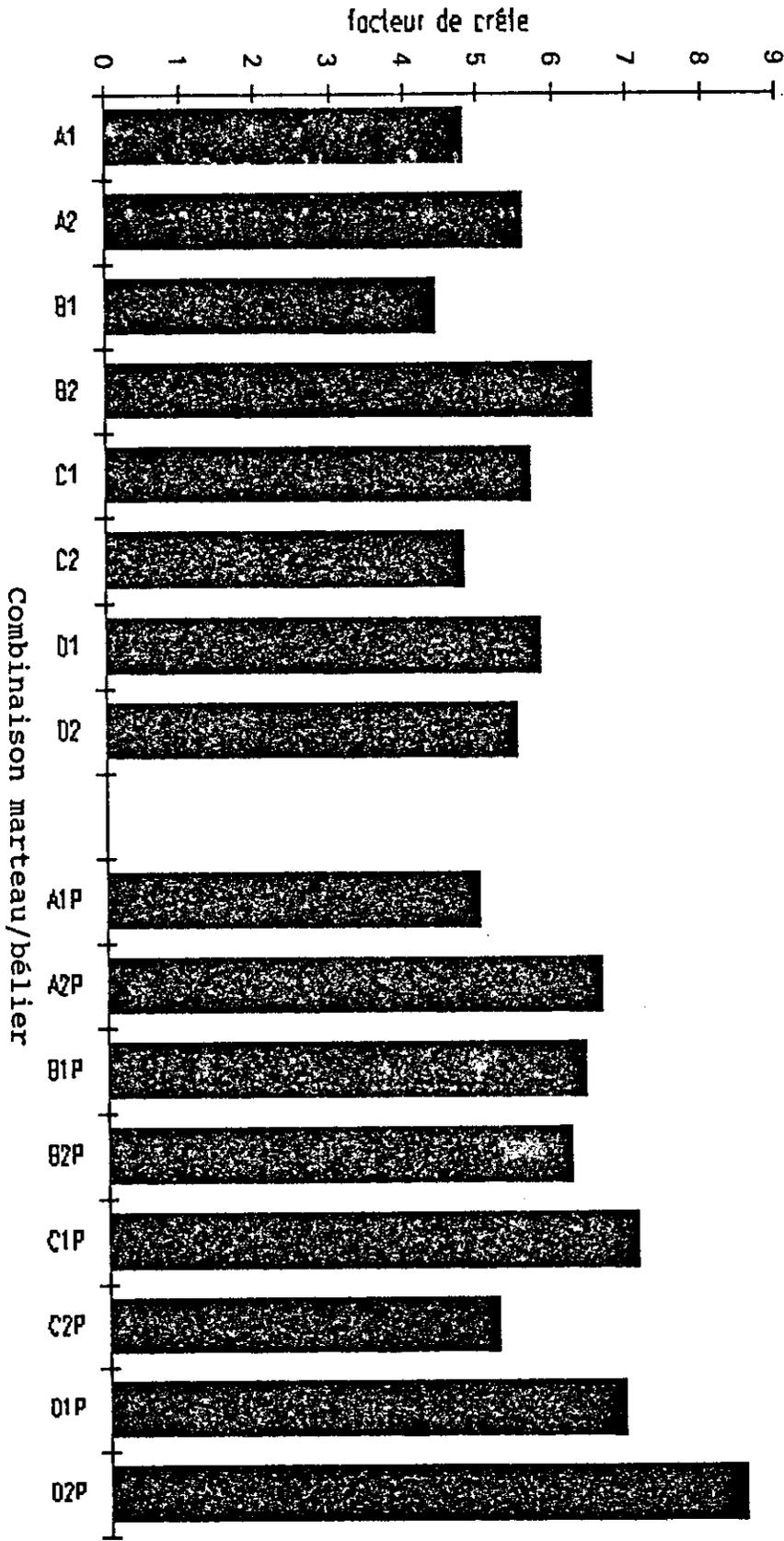
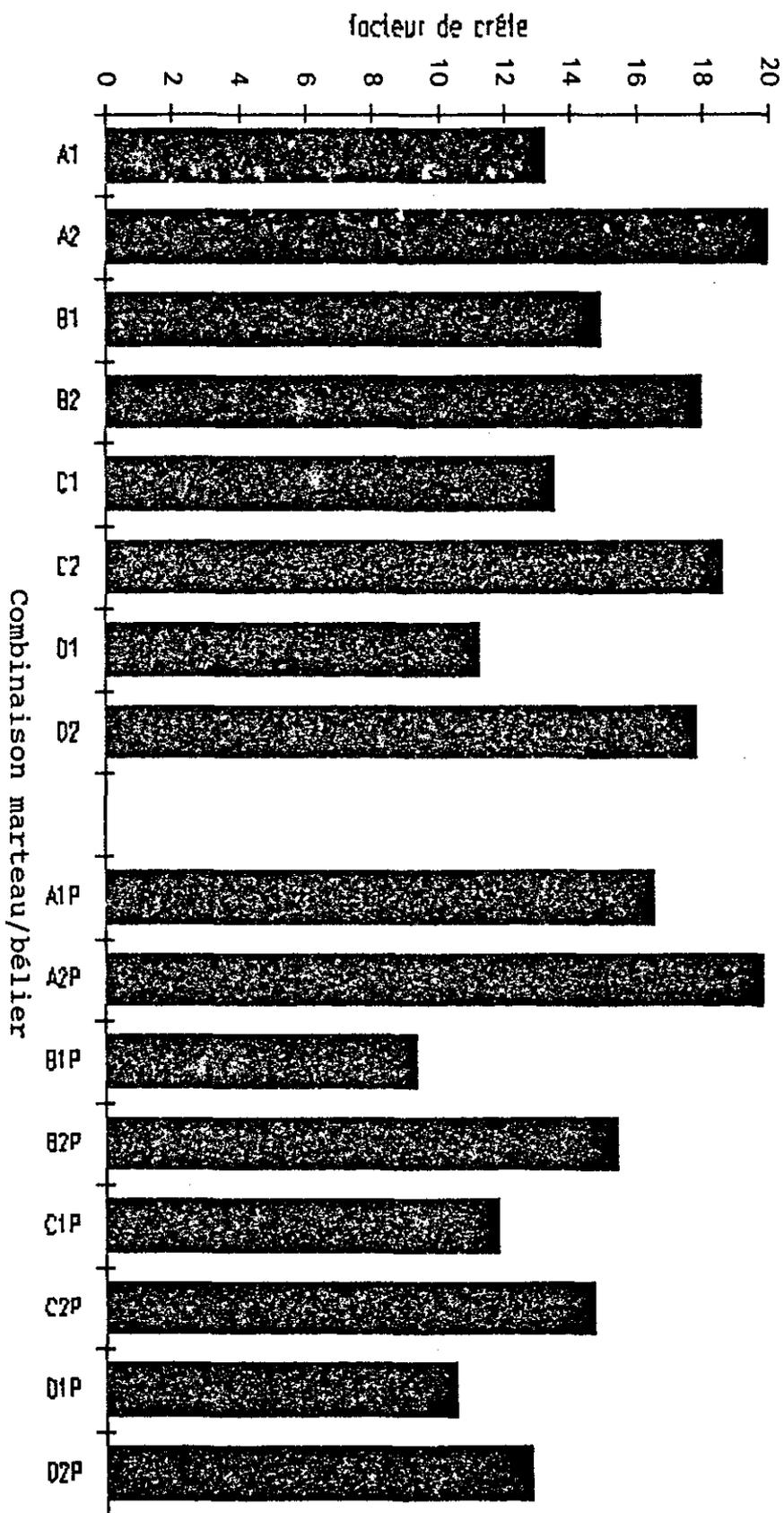


Tableau 11. Facteur de crête mesuré à partir des vibrations pondérées sur la poignée des marteaux (zh) 6.3-1250 Hz.

Tableau 12. Facteur de crête à partir des vibrations non pondérées sur la poignée des béliers (zh) 6.3-5000 Hz.



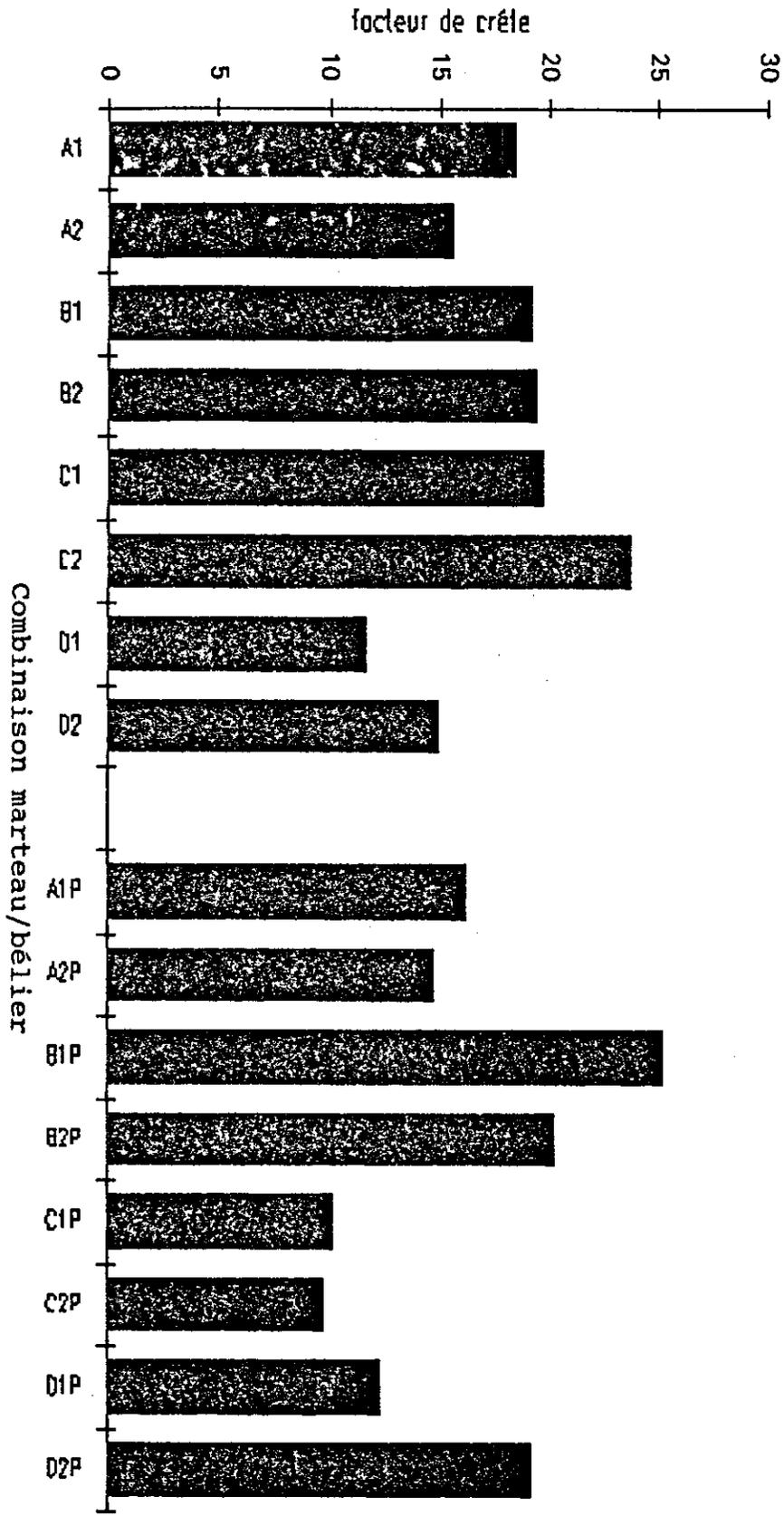


Tableau 13. Facteur de crête à partir des vibrations non pondérées sur la poignée des marteaux (zh) 6.3-5000 Hz.